



Contribution à la modélisation du comportement visco-hyper-élastique de mousses de polyuréthane : Validation expérimentale en quasi-statique

Minglei Ju

► To cite this version:

Minglei Ju. Contribution à la modélisation du comportement visco-hyper-élastique de mousses de polyuréthane : Validation expérimentale en quasi-statique. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2014. Français. NNT : 2014MULH8865 . tel-01223675

HAL Id: tel-01223675

<https://theses.hal.science/tel-01223675>

Submitted on 3 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à la modélisation du comportement visco-hyper-élastique de mousses de polyuréthane - Validation expérimentale en quasi-statique

THESE

présentée pour obtenir le titre de

Docteur

de l'Université de Haute Alsace

(spécialité mécanique)

par

Minglei JU

Composition du jury

Rapporteurs :	Pr. Mohamed Ichchou	Ecole centrale de Lyon, Laboratoire LTDS
	Dr. HDR. Sébastien Roth	Université Technologique de Belfort Montbéliard, Laboratoire M3M
Examineurs :	Pr. Nadia Bahlouli	Université de Strasbourg, Laboratoire ICUBE
	Dr. Marc Lauth	Faurecia Automotive Seating
Directeur de thèse :	Pr. Evelyne Aubry	Université de Haute Alsace, Laboratoire MIPS
Co-encadrant :	Dr. Raphaël Dupuis	Université de Haute Alsace, Laboratoire MIPS

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au laboratoire de Modélisation Intelligence Processus Systèmes (MIPS) de l'Université de Haute Alsace (UHA).

Je tiens à adresser en premier lieu mes plus chaleureux remerciements à Madame Evelyne Aubry, Professeur à l'Université de Haute Alsace et directrice de cette thèse, pour le privilège qu'elle m'a offert en m'accueillant dans son équipe.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Raphaël Dupuis, Docteur, Maître de conférences à l'Université de Haute Alsace et co-directeur de cette thèse, pour son soutien actif et les conseils prodigués qui ont permis l'achèvement de ce travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur Mohamed Ichchou, Professeur à l'Ecole centrale de Lyon, de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ce travail.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Sébastien Roth, Maître de conférences à l'Université Technologique de Belfort Montbéliard pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame Nadia Bahlouli, Professeur à l'Université de Strasbourg pour le privilège qu'elle m'a offert en acceptant d'examiner cette thèse.

Je tiens également remercier à Monsieur Marc Lauth, Faurecia Automotive Seating, pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Il m'est aussi particulièrement agréable de remercier Monsieur Hamdi Jmal, Docteur de l'Université de Haute Alsace pour les longues, fructueuses et riches réflexions.

Je n'oublie pas de remercier les personnels du laboratoire MIPS et de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Sud Alsace pour leur aide et leur soutien.

Je tiens à remercier tous mes collègues de MIPS, en particulier Messieurs Trinh Minh Hoang, Olivier Duboeuf et Florent Casasola.

Un grand merci à mes parents, à ma sœur, à ma copine, à toute ma famille et à mes amis pour leurs encouragements et leur affection.

Résumé

La mousse flexible de polyuréthane est couramment utilisée dans nombreuses applications telles que acoustiques, thermiques et de bâtiment grâce à sa faible densité et à son pouvoir d'isolation thermique et acoustique. Elle est également utilisée dans les applications de confort pour les sièges tels que véhicule, train, avion etc. grâce sa faible raideur et à son pouvoir à absorber l'énergie de déformation. Pour optimiser le confort des systèmes d'assise, il est nécessaire de modifier le siège et en particulier la partie flexible, c'est-à-dire la mousse de polyuréthane.

Les objectifs principaux de cette thèse consistent à identifier puis à modifier le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane sous différentes conditions d'essais sous grandes déformations.

Des essais de compression/décompressions unidirectionnels monocycle et multicycle à différentes vitesses de déformations ont été réalisés sur trois types de mousse de polyuréthane, afin de comprendre le comportement du matériau. Ces essais ont permis de déduire que les mousses de polyuréthanes sous grandes déformations présentent à la fois un comportement hyperélastique et un comportement viscoélastique. Ils ont également montré que les mousses de polyuréthanes présentent un phénomène d'assouplissement appelé 'effet de Mullins' lors que les essais de compression/décompressions multicycle, c'est-à-dire que les contraintes dans 1^{er} cycle sont moins faibles que les contraintes dans les cycles suivants pour une même déformation.

Sur la base des résultats d'expérimentaux et afin de modifier le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane, nous avons développé trois modèles visco-hyperélastiques qui se composent de deux éléments à savoir la partie modèles énergétiques hyperélastiques, utilisés généralement pour des matériaux à comportement caoutchoutique, et la partie modèle à mémoire entier qui tient compte de l'historique et permettant de décrire le comportement viscoélastique.

Les paramètres des modèles ont été identifiés en utilisant la méthode d'identification et la méthode d'optimisation appropriée. Les résultats des modélisations du comportement mécanique de la mousse sur les essais monocycles et multicycles ont été comparés aux résultats expérimentaux, montreront à la fois une très bonne capacité à simuler le 1^{er} cycle de charge/décharge, ainsi que les cycles suivant. Nos modèles ont prouvé leur capacité à modéliser l'effet de Mullins sur les mousses de polyuréthane souple. Ces modèles ont été validés sur les trois types de mousse et pour trois vitesses de sollicitation, permettent de conclure leurs efficacités et de leurs représentativité.

Mots clés : mousses de polyuréthane, essais de compression/décompressions, comportement quasi-statique, comportement hyperélastique, comportement viscoélastique, modèles visco-hyperélastiques, effet de Mullins.

Abstract

Flexible polyurethane foam is widely used in numerous applications such as acoustic, thermal and building due to its low density and its ability to absorb thermal and acoustic energy. It is also used for the comfort of the seats such as the vehicle, train, plane due to its low stiffness and its ability to absorb deformation energy. In order to optimize the comfort of the car seat, it is necessary to model the behavior of seat system, particularly the flexible component - polyurethane foam.

The main objective of this study is to identify and model the quasi-static behavior of polyurethane foam under different test conditions in large deformations.

Compression / decompression uniaxial unicycle and multicycle tests were carried out on three types of polyurethane foam at different strain rates, which allows us to understand the behavior of the material. The results of the tests indicate that the polyurethane foams exhibit a hyperelastic behavior and a viscoelastic behavior under large deformations. They also showed that the polyurethane foams have a stress softening phenomenon which is called 'Mullins effect' during the compression / decompression multicycle tests. In other words, the stress in first cycle is lower than the stresses in the subsequent cycles in the same deformation. 'Mullins effect' for the polyurethane foam is also an important study in this dissertation.

Based on the experimental results and the goal of modeling quasi-static behavior of the polyurethane foam, three visco-hyperelastic models were developed. These models consist in two elements: hyperelastic models, which is normally used for description the behavior of rubber materials, and entire memory model which takes into account the history and describing the viscoelastic behavior.

Model parameters were identified using appropriate identification and optimization methods. The results of modeling the mechanical behavior of the foam on the unicycle and multicycle tests were compared with experimental results. The models showed a very good competence to simulate the first cycle and the following cycles during the charge / discharge tests. Our models have proven its ability to model Mullins effect on flexible polyurethane foams.

These models have been validated on three types of foam in order to present a comparative study of their effectiveness and their representativeness.

Keywords: polyurethane foams, compression/decompression test, quasi-static behavior, hyperelastic behavior, viscoelastic behavior, visco-hyperelastic models, Mullins effect

Liste des communications scientifiques

➤ Publications dans des journaux internationaux avec comité de lecture

- (1) **Ju, M. L.**, Mezghani, S., Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E. Parameter Estimation of a Hyperelastic Constitutive Model for the Description of Polyurethane Foam in Large Deformation. Cellular Polymers, (2013) 32(1), 21-40. (publié)
- (2) **Ju, M. L.**, Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E. A Comparison among Polynomial Model, Reduced Polynomial Model and Ogden Model for Polyurethane Foam. Advanced Materials Research, (2014) 856, 169-173. (publié)
- (3) **Ju, M. L.**, Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E. Visco-hyperelastic constitutive model for modeling the quasi-static behavior of polyurethane foam in large deformation. Polymer engineering and science, (2014). (publié)
- (4) Jmal, H., **Ju, M. L.**, Dupuis, R., & Aubry, E. Generalization of the memory integer model for the analysis of the quasi-static behaviour of polyurethane foams. Journal of Mechanical Science and Technology, (2014). (accepté)

➤ Congrès internationaux avec actes et comité de lecture

- (1) **Ju, M. L.**, Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E., A comparison among Polynomial model, Reduced polynomial model and Ogden model for polyurethane foam, the 2nd International Conference on Material Science and Engineering Technology, London, England, November 2013.
- (2) **Ju, M. L.**, Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E., Identification du comportement quasi-statique de la mousse de Polyuréthane au travers d'un modèle énergétique et à mémoire, Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, August 2013.
- (3) **Ju, M. L.**, Jmal, H., Dupuis, R., & Aubry, E., Etude du comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane-Appliquée des modèles énergétiques, Doctoriales d'Alsace, June 2012.
- (4) Jmal, H., **Ju, M. L.**, Dupuis, R., & Aubry, E., Experimental identification of foam parameters using memory integer model, DYMAT International conference, Strasbourg, France, December 2010.

Table de matières

Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Bibliographie.....	3
1.1 Introduction sur les mousses de polyuréthane.....	3
1.1.1 Base de chimie des polyuréthanes.....	3
1.1.2 Méthodes de formulation	6
1.1.3 Méthodes de fabrication	7
1.1.4 Structure alvéolaire de la mousse.....	8
1.2 Caractérisation mécanique de la mousse.....	10
1.2.1 Paramètres influents	10
1.2.2 Tests statiques.....	11
1.2.3 Tests quasi-statiques	12
1.2.3.1 Essais de compression/décompression.....	13
1.2.3.2 Essais d'indentation.....	14
1.2.3.3 Essais de cisaillement.....	14
1.2.4 Test dynamiques	15
1.2.4.1 Tests de rebondissement.....	15
1.2.4.2 Tests 'masse libre'	16
1.2.5 Comportement mécanique de la mousse	18
1.2.5.1 Comportement hyperélastique.....	19
1.2.5.2 Comportement viscoélastique	20
1.2.5.3 Effet de Mullins.....	21
1.3 Modélisation du comportement mécanique des mousses	23
1.3.1 Les modèles micromécaniques.....	23
1.3.2 Les modèles macromécaniques	24
1.3.2.1 Les modèles hyperélastiques	24
1.3.2.2 Les modèles viscoélastiques.....	26
1.3.2.3 Les modèles �m�moire.....	27
1.4 Identification et optimisation.....	30
1.4.1 Méthodes d'identification des modèles.....	30
1.4.1.1 La méthode de la contrainte moyenne.....	30

1.4.1.2 La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge.....	31
1.4.2 Méthodes d'optimisation des modèles	32
1.4.2.1 Méthodes déterministes	32
1.4.2.2 Méthodes stochastiques (non déterministes).....	33
1.5 Conclusion du chapitre I	33
Chapitre II: Etude expérimentale	35
2.1 Introduction	35
2.2 Caractérisation physico-chimique des mousses	35
2.2.1 Type de mousse	35
2.2.2 Géométrie des échantillons	35
2.2.3 Masse volumique.....	38
2.2.4 Méthode de mesure de la porosité.....	39
2.2.5 Tableau récapitulatif	40
2.3 Protocole expérimental de compression/décompression.....	40
2.3.1 Machine d'essai.....	41
2.3.2 Essais de compression/décompression monocycle	41
2.3.3 Essais de compression multi cycles	43
2.4 Résultats expérimentaux	44
2.4.1 Résultats sur le premier cycle.....	45
2.4.2 Résultats sur les quatre cycles	48
2.5 Conclusion du chapitre II	53
Chapitre III: Comparaison de trois modèles visco-hyperélastiques	54
3.1 Introduction	54
3.2 Modélisation et mise en œuvre.....	55
3.2.1 Modélisation du comportement viscoélastique	56
3.2.2 Modélisation du comportement hyperélastique des mousses	58
3.2.2.1 Modèle d'Ogden.....	59
3.2.2.2 Modèle polynomial	59
3.2.2.3 Modèle polynomial réduit	60
3.2.3 Méthodes d'identification et approches d'optimisation	61
3.2.3.1 Méthodes d'identification	61
3.2.3.2 Approches d'optimisation	63
3.3 Résultats de la modélisation du comportement mécanique.....	64

3.3.1 La viscoélasticité (modèle à mémoire entier).....	64
3.3.2 L'hyperélasticité (Modèle d'Ogden, modèle polynomial, modèle polynomial réduit)	67
3.3.2.1 Modèle d'Ogden.....	67
3.3.2.2 Modèle polynomial (Mooney-Rivlin)	69
3.3.2.3 Modèle polynomial réduit (neo-Hookeen).....	72
3.3.2.4 Modèles globaux	74
3.3.3 Résultats globaux	74
3.3.3.1 Modèle visco-hyperélastique d'Ogden.....	74
3.3.3.2 Modèle visco-hyperélastique polynomial	76
3.3.3.3 Modèle visco-hyperélastique polynomial réduit	77
3.4 Comparaisons entre les résultats obtenues sur trois mousses par les trois vitesses	79
3.4.1 Comparaison des 3 modèles	79
3.4.2 Comparaison des 3 mousses.....	80
3.5 Conclusion du chapitre III.....	82
Chapitre IV: Modélisation de l'effet de Mullins	83
4.1 Introduction	83
4.2 Modélisation de l'effet de Mullins	84
4.2.1 Expression du modèle viscoélastique pour 4 cycles	84
4.2.2 Expression du modèle hyperélastique pour 4 cycles.....	89
4.3 Résultats de l'identification sur 3 mousses avec 3 vitesses	90
4.3.1 Résultats de la mousse A pour 3 vitesses lors des 4 cycles	90
4.3.1.1 Résultats de la mousse A pour le test 1 lors des 4 cycles	90
4.3.1.2 Résultats de la mousse A pour le test 2 lors des 4 cycles	95
4.3.1.3 Résultats de la mousse A pour le test 3 lors des 4 cycles	98
4.3.1.4 Comparaison des trois tests pour la mousse A lors des 4 cycles	100
4.3.2 Résultats de la mousse B pour 3 vitesses lors des 4 cycles.....	102
4.3.3 Résultats de la mousse C pour 3 vitesses lors des 4 cycles.....	105
4.4 Résultats des comparaisons entre les trois mousses pour les trois vitesses	109
4.5 Conclusion du chapitre IV.....	111
Conclusion générale et perspectives	112
Références bibliographiques	115

Liste des figures

Figure	page
I-1 Applications des mousses de polyuréthane souples.....	3
I-2 Structures moléculaires pour les polyuréthanes	4
I-3 Composés du polyuréthane	6
I-4 Structure de la cellule de la mousse de polyuréthane: a, Structure de dodécaèdre pentagonal [PEL12] ; b, Modèle de cellule ouverte [GIB97] ; c, Modèle de cellule fermée [ZHU99, DEN12]	8
I-5 Structure de mousse souple (a) et rigide (b).....	9
I-6 Structure de mousse ouverte (a) [GIB97] et fermée (b) [SAI06].....	9
I-7 Courbe de compression de la mousse polyuréthane	11
I-8 Essai de fluage [OUD93]	12
I-9 Essai de relaxation [LEM04]	12
I-10 Représentation d'un essai de compression /décompression [PEL12].....	13
I-11 Courbe d'un essai de compression/décompression d'une mousse polyuréthane.....	13
I-12 Dispositif d'essai d'indentation. a. test d'indentation de base panneaux sandwich composites [RIZ05]; b. test d'indentation d'un siège de voiture [BEL06].....	14
I-13 Dispositif expérimental de cisaillement. a. dispositif cisaillement simple [LI09]; b. dispositif quadruple cisaillement [PRU00]	15
I-14 Dispositif de test de rebondissement (www.zwick.de)	16
I-15 Schématisation d'un essai 'masse libre'	16
I-16 Dispositif de test 'masse libre' [JMA12]	17
I-17 Dispositif d'essais dynamiques [JMA12]	18
I-18 Comportement hyperélastique, viscoélastique et newtonien [OUD94].....	19
I-19 Réponse en force de la mousse de polyuréthane dans le cas de faibles et grandes amplitudes de vibrations [WHI98]	20
I-20 Effet de Mullins [WHI98]	22
I-21 Les modèles élémentaires de la viscoélasticité [JMA12]	27
I-22 Eléments d'une modélisation mécanique [JMA12]	28
I-23 Les résultats deux modèles à mémoire : entier et fractionnaire [JMA12]	29
I-24 La méthode de la contrainte moyenne [JMA12].....	30
I-25 La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge [JMA12].....	31
I-26 Algorithme des méthodes d'optimisation déterministes basées sur la recherche d'une direction descendante [JMA12]	32
I-27 Méthodes stochastiques (non déterministes) [HAJ03].....	33

II-1	Essai de cisaillement pour évaluer les effets d'échelles [RAK05]	36
II-2	Courbes des déformations en fonction des contraintes pour chaque région [RAK05].....	37
II-3	Schéma de découpe des échantillons	37
II-4	Dispositif expérimental pour la mesure de la masse volumique de la mousse	38
II-5	Dispositifs d'essai de microscopique	39
II-6	Les images des cellules de trois mousses.....	40
II-7	Dispositif d'essai de compression/décompression unidirectionnel.....	41
II-8	Evolution de la contrainte maximale pendant le 4 ^{ème} cycle en fonction de la vitesse de déformation pour la mousse A [JMA12]	42
II-9	Contrainte de 50% compression du cycle 1 au cycle 5 pour trois mousses.....	44
II-10	Compression/décompression dans le cas de test 1: (a) mousse A; (b) mousse B; (c) mousse C.....	45
II-11	Contrainte/déformation de la mousse A : (a) test 1; (b) test 2; (c) test 3.....	47
II-12	Les résultats de comparaisons de trois mousses dans le cas de test 1	47
II-13	Les résultats de 4 cycles pour trois mousses dans le cas de Test 1(a), mousse A; (b), mousse B; (c), mousse C	49
II-14	Les résultats de trois mousses en chaque cycle dans le cas de test 1 (a), cycle 1; (b), cycle 2; (c), cycle 3; (d), cycle 4	50
II-15	Courbes charge (gauche) et décharge (droite) de la mousse A pour chaque cycle selon les trois tests (a), cycle 1; (b), cycle 2; (c), cycle 3; (d), cycle 4.....	52
III-1	Déformation d'échantillon	58
III-2	Méthodes d'identification	61
III-3	Relation de déformation-temps	62
III-4	Différence de contrainte entre la charge et la décharge (modélisation et expérimentation). (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C	65
III-5	Contrainte viscoélastique. (a) Mousse A in test 1; (b) Mousse B in test 2; (c) Mousse C in test 3	66
III-6	Comparaison du modèle d'Ogden avec N=1, N=2 et N=3	67
III-7	Résultats hyperélastiques du modèle d'Ogden dans le test 1 (a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C	69
III-8	Comparaison du modèle polynomial avec N=1, N=2 et N=3.....	69
III-9	Résultats hyperélastiques du modèle polynomial dans le test 1 (a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C	71
III-10	Comparaison du modèle polynomial réduit avec N=1, N=2 et N=3	72
III-11	Résultats hyperélastiques du modèle polynomial réduit dans le test 1 (a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C.....	74
III-12	Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique d'Ogden dans le test 1. (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C	75

III-13	Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique polynomial dans le test 1. (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C	77
III-14	Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit dans le test 1. (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C	78
III-15	Différence de contrainte entre la charge et la décharge (mousse A, B et C ; test 1)	80
III-16	Contrainte viscoélastique des trois mousses dans le test 1	80
III-17	Contrainte hyperélastique du modèle d'Ogden des trois mousses dans le test 1	81
IV-1	Effet de Mullins.....	83
IV-2	Courbe d'élongation-temps pour le cycle 1	85
IV-3	Courbe d'élongation-temps pour le cycle 2	86
IV-4	Courbe d'élongation-temps pour le cycle 3	87
IV-5	Courbe d'élongation-temps pour le cycle 4	89
IV-6	Résultats expérimentaux : Différences de contraintes entre la charge et décharge pour la mousse A (test 1)	90
IV-7	Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse A (test 1)	91
IV-8	Contraintes viscoélastiques du modèle de la mousse A dans le test 1 pour 4 cycles.....	92
IV-9	Comparaison des courbes expérimentales et modèles des contraintes hyperélastiques	92
IV-10	Reconstruction de la contrainte viscoélastique, de la contrainte hyperélastique et de la contrainte globale pour la mousse A (test 1).....	93
IV-11	Courbes contrainte-d'élongation globales pour la mousse A (test 1)	94
IV-12	Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse A dans le cas du test 2.....	95
IV-13	Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la contrainte hyperélastique pour la mousse A dans le cas du test 2	96
IV-14	Reconstruction de la contrainte viscoélastique, de la contrainte hyperélastique et de la contrainte globale pour la mousse A dans le cas du test 2	97
IV-15	Courbes contrainte-d'élongation globales pour la mousse A dans le cas du test 2.....	97
IV-16	Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contraintes entre la charge et la décharge pour la mousse A dans le cas du test 3 des 4 cycles	98
IV-17	Comparaison des courbes hyperélastiques pour la mousse A dans le cas du test 3.....	99
IV-18	Courbes contrainte-d'élongation globales (mousse A, test 3, 4 cycles)	99
IV-19	Comparaisons des contraintes hyperélastiques sur trois tests pour la mousse A	100

IV-20	Comparaisons des contraintes visco élastiques sur les trois tests pour la mousse A.....	101
IV-21	Comparaisons des contraintes globales sur les trois tests pour la mousse A	101
IV-22	Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse B dans le cas du test 1	102
IV-23	Comparaison des courbes hyper élastiques pour la mousse B dans le cas du test 1.....	104
IV-24	Les courbes contrainte-d éformation globales pour la mousse B dans le cas du test 1	105
IV-25	Courbes des différences de contraintes pour la mousse C dans le cas du test 1	106
IV-26	Comparaison des courbes hyper élastiques pour la mousse C dans le cas du test 1.....	107
IV-27	R éponses en termes de contraintes du modèle en fonction du temps	108
IV-28	R ésultats globaux de contrainte-d éformation	108
IV-29	Comparaisons des résultats hyper élastiques des trois mousses pendant 4 cycles sur le test 1	109
IV-30	Comparaisons des résultats visco élastiques des trois mousses pendant 4 cycles sur le test 1	109
IV-31	Comparaisons des résultats globaux des trois mousses pendant 4 cycles (test 1) ...	110

Liste des tableaux

Tableau	Page
II-1	Masses volumiques des mousses A, B and C..... 39
II-2	Porosités des mousses A, B and C 40
II-3	Caractéristiques chimiques et morphologiques des trois mousses..... 40
II-4	Vitesses limites entre quasi-statique et dynamique pour les mousses A, B et C [JMA12] 42
II-5	Les conditions des essais de compression/décompression pour trois mousses..... 43
II-6	Nombre minimal des échantillons utilisés pour trois vitesses et trois mousses 43
II-7	Les valeurs de contrainte en MPa de chaque cycle pour les trois mousses A, B et C 44
II-8	Variation entre cycles 44
III-1	Transformations des paramètres dimensionnels en paramètres adimensionnels 63
III-2	Les paramètres viscoélastiques adimensionnels 64
III-3	Erreurs relatives de la viscoélasticité 65
III-4	Erreurs relatives du modèle d'Ogden avec N=1, N=2 et N=3 67
III-5	Valeurs des paramètres du modèle d'Ogden 68
III-6	Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle d'Ogden) 69
III-7	Erreurs relatives du modèle de polynomial avec N=1, N=2 et N=3 70
III-8	Paramètres du modèle polynomial 70
III-9	Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle polynomial) 71
III-10	Erreurs relatives du modèle de polynomial réduit avec N=1, N=2 et N=3..... 72
III-11	Valeurs des paramètres hyperélastiques du modèle polynomial réduit..... 73
III-12	Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle polynomial réduit)..... 74
III-13	Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique d'Ogden 76
III-14	Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique polynomial 77
III-15	Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique polynomial réduite..... 78
III-16	Erreurs relatives des modèles visco-hyperélastiques 79
IV-1	Valeurs des paramètres viscoélastiques de 4 cycles pour la mousse A (test 1) 91
IV-2	Erreurs relatives des paramètres viscoélastiques de 4 cycles (Mousse A, test 1) 91
IV-3	Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden (mousse A, test 1, 4 cycles) 93
IV-4	Erreurs des paramètres hyperélastiques de 4 cycles pour la mousse A (test 1)..... 93
IV-5	Erreurs globales des paramètres des 4 cycles pour la mousse A (test 1)..... 94
IV-6	Valeurs des paramètres viscoélastiques du modèle à mémoire (mousse A, test 2) 95
IV-7	Erreurs des paramètres viscoélastiques des 4 cycles pour la mousse A (test 2)..... 95

IV-8	Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden des 4 cycles (mousse A, test 2)	96
IV-9	Erreurs des paramètres hyperélastiques des 4 cycles pour la mousse A (test 2)	96
IV-10	Erreurs globales des paramètres des 4 cycles pour la mousse A (test 2)	97
IV-11	Valeurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A (test 3)	98
IV-12	Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A (test 3)	98
IV-13	Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden de 4 cycles test 3	99
IV-14	Erreurs globales des paramètres des 4 cycles (mousse A, test 3, 4 cycles)	100
IV-15	Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse A	100
IV-16	Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A	101
IV-17	Erreurs globales pour la mousse A	102
IV-18	Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse B	103
IV-19	Valeurs des paramètres viscoélastiques du modèle sur les trois tests (mousse B, 4 cycles)	103
IV-20	Valeurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse B	104
IV-21	Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse B	104
IV-22	Erreurs globales pour la mousse B	105
IV-23	Valeurs des paramètres viscoélastiques analytiques de la mousse C	106
IV-24	Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse C	106
IV-25	Valeurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse C	107
IV-26	Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse C	107
IV-27	Erreurs globales pour la mousse C	108

Introduction générale

Les mousses de polyuréthane sont des matériaux cellulaires formés par la réaction simultanée d'un polyol avec un isocyanate. D'autres additifs de différentes caractéristiques sont couramment utilisés dans le processus de fabrication des mousses de polyuréthane. La mousse souple de polyuréthane ainsi obtenue est une des principales matières synthétiques. A l'échelle industrielle, les mousses de polyuréthane peuvent être fabriquées soit par procédé discontinu, où la mousse est produite en versant le mélange dans des moules, soit par procédé continu, où la mousse est produite en débitant le mélange sur un tapis roulant. Selon la forme de connexion des cellules, les mousses de polyuréthane peuvent être classées en mousses à cellules ouvertes, où les pores sont connectés entre eux, et mousse à cellules fermées, où les parois ne sont pas percées et qu'il n'existe pas de chemin continu entre les cellules.

Les mousses de polyuréthane ont des propriétés très intéressantes telles qu'une excellente isolation thermique et acoustique, une faible densité (inférieure généralement à 80 kg m⁻³ pour les mousses souples), une haute résistance spécifique, une diffusion complexe de la lumière et une forte absorption des liquides. Pour toutes ces raisons, les mousses de polyuréthane sont couramment utilisées dans de nombreuses applications acoustiques, thermiques et de bâtiment tels que les assises et matelassures dans l'ameublement, les pièces diverses destinées à l'industrie textile, l'habillement, l'emballage, l'isolation acoustique ou thermique, la filtration etc. D'un point de vue mécanique, la mousse de polyuréthane est caractérisée par son pouvoir à absorber l'énergie de déformation. Ainsi, elle est en particulier utilisée dans les applications de confort dans l'industrie automobile pour les assises de sièges.

Cette thèse porte sur la modélisation du comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane, utilisée pour le siège de véhicule. La spécificité de notre étude réside dans la complexité du domaine d'application de la mousse de polyuréthane sur le siège de voiture, à savoir l'étude du comportement quasi-statique de la mousse sous grande déformation. L'objectif de notre travail est de bien comprendre le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane, puis d'implanter ces modèles mécaniques pour prévoir les réponses sous différentes conditions d'essais en quasi-statique. Pour cette raison, nous avons séparé notre travail en 4 parties.

Dans la première partie, il s'agira d'une étude bibliographique. Les bases de chimie de la mousse de polyuréthane ainsi que certains paramètres qui ont une influence sur le comportement mécanique, de formulation et fabrication seront présentées. Une synthèse des différentes méthodes d'essais classiques et des différentes études seront détaillées. Nous présenterons également l'effet de Mullins que l'on retrouve souvent dans les matériaux caoutchoutiques, mais qui a été rarement étudié dans les mousses de polyuréthane. Une analyse de différents types de modèles, à savoir les modèles micromécaniques et les modèles macromécaniques nous permet, après la comparaison de leurs qualités et de leurs défauts, de choisir une orientation pour la modélisation du comportement de la mousse de polyuréthane. Enfin, une synthèse des méthodes d'identification et des méthodes d'optimisation comme outil nécessaire à l'identification seront données.

Afin de disposer de données fiables pour aborder la modélisation, le chapitre 2 portera sur notre étude expérimentale. Après avoir détaillé la caractérisation physico-chimique de nos échantillons, nous présenterons les protocoles d'essai de compression/décompression unidirectionnelles monocycle et multicycle que nous avons menés. Les résultats des différents essais seront largement discutés, permettant de mettre en évidence le comportement de différentes mousses de polyuréthane sous grande déformation.

Dans le 3^{ème} chapitre, nous procéderons à la comparaison de différentes formulations destinées à la modélisation du comportement de la mousse pendant le 1^{er} cycle. Nous chercherons à identifier les paramètres du modèle décrivent la viscoélasticité puis les paramètres de différents modèles hyperélastiques généralement établis pour les matériaux compressibles. Une comparaison des résultats des modélisations avec les courbes expérimentales sera conduite, permettant de choisir le meilleur modèle pour modéliser le comportement de l'effet de Mullins de la mousse étudiée dans la partie suivante.

Le chapitre 4 sera consacré à la modélisation de l'effet de Mullins à l'aide du modèle visco-hyperélastique choisi au chapitre 3. L'identification des paramètres du modèle pour trois types de mousses, pour trois vitesses de sollicitation et pour 4 cycles de charge/décharge nous permettra de conclure à l'adéquation du modèle pour la modélisation de l'effet du Mullins pour les mousses de polyuréthane souple à plusieurs cycles de compression/décompression.

Chapitre I: Bibliographie

1.1 Introduction sur les mousses de polyuréthane

La mousse souple de polyuréthane est une des principales matières synthétiques. Les caractéristiques principales de la mousse de polyuréthane sont une relativement faible densité (inférieure généralement à 80 kg m^{-3} pour les mousses souples) et une haute résistance spécifique. En fonction des différentes matières premières et des formulations utilisées, il peut être fabriqué plusieurs types de mousses telles que les mousses de polyuréthane souples, semi-rigides et rigides. La mousse de polyuréthane est principalement utilisée dans les meubles, la literie et autres articles ménagers telles que les canapés et chaises, coussin arrière, matelas et oreillers. Elle est également utilisée pour l'isolation frigorifique des équipements, des plaques d'isolation, des murs, l'isolation des tuyaux, l'isolation des réservoirs, les matériaux de calfeutrage en mousse à composant unique (Figure I-1).

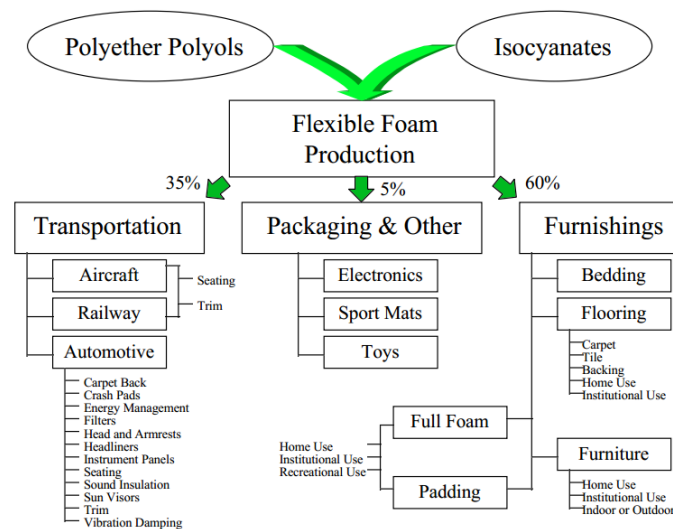
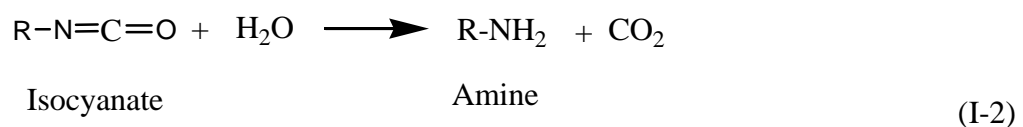
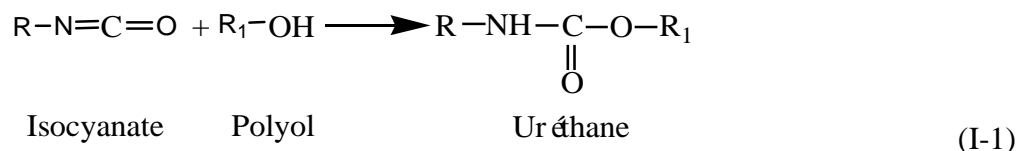
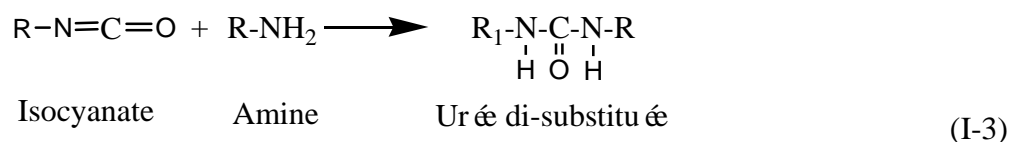


Figure I-1: Applications des mousses de polyuréthane souples [HER97]

1.1.1 Base de chimie des polyuréthanes

Les polyuréthanes (PU) sont des polymères contenant des groupes uréthane dans la chaîne moléculaire. Ils sont les éléments réactifs caractérisés par la présence du groupement $\text{N}=\text{C}=\text{O}$. Les uréthanes sont issus de la réaction de polycondensation entre un isocyanate et un composé de polyol (hydroxyle). La réaction de polymérisation dans l'uréthane peut être représentée par les équations suivantes [SAU64] :





Les polyuréthanes peuvent être divisés en deux types : les thermoplastiques, pour qui la matière du produit formé peut être ramenée à son état initial, ils sont donc recyclables et les thermodurcissables, pour qui la réaction est irréversible, ils sont donc non-recyclables. Les polyuréthanes thermoplastiques ont des macromolécules purement linéaires (figure I-2a), alors que les thermodurcissables ont des structures tridimensionnelles non linéaires (figure I-2b).

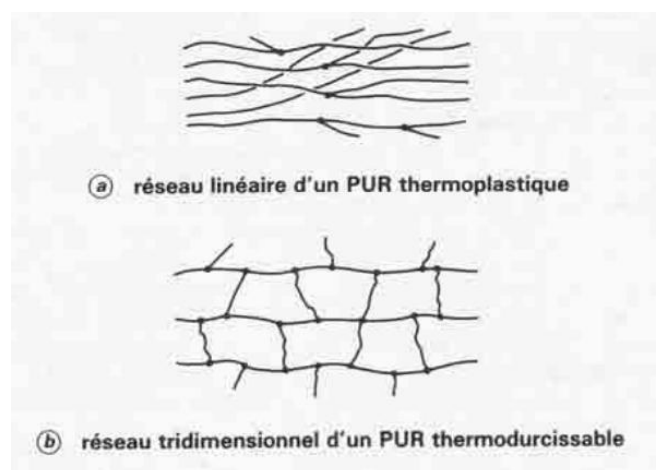


Figure I-2: Structures moléculaires pour les polyuréthanes [HAT88]

Les polyuréthanes sont couramment synthétisés à partir de trois matières initiales: les isocyanates, les polyols et les adjuvants [HAT88].

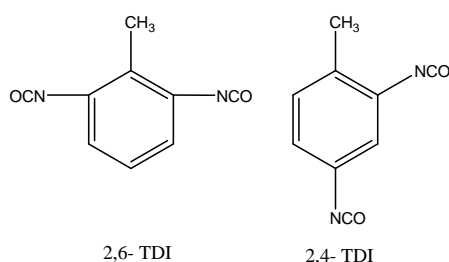
• Isocyanates

Les isocyanates sont des matières premières nécessaires pour tous les polyuréthanes. Ils ont des structures aromatiques correspondant :

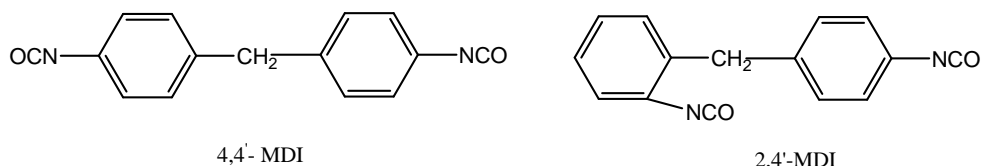
- aux isomères 2,4- et 2,6- du diisocyanate de toluène (TDI) (équation I-4) qui est principalement utilisé dans la fabrication de mousses de polyuréthane souples, des élastomères de polyuréthane, les revêtements ;
- aux 2,4' et -4,4'- diisocyanate de diphenylméthane (MDI) (équation I-5) qui est couramment utilisé dans la fabrication d'élastomères thermoplastiques de polyuréthane, de résine synthétique.

Ils ont également des structures aliphatiques correspondant :

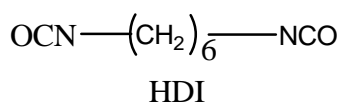
- à l'hexaméthylène diisocyanate (HDI) (équation I-6) plus particulièrement utilisé pour des revêtements résistant à la lumière.
- au l'isophorone diisocyanate (IPDI) (équation I-7) qui présente une caractéristique de non-jaunissement, pour la fabrication de revêtement de polyuréthane non-jaunissant [PEL12].



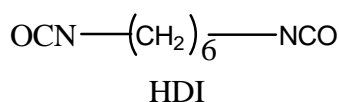
(I-4)



(I-5)



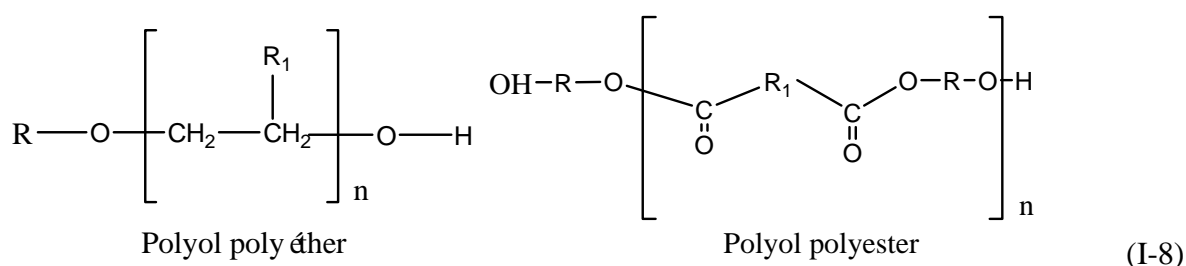
(I-6)



(I-7)

• Polyols

En plus des isocyanates, les polyols sont des constituants essentiels pour la formation de polyuréthanes. Deux types de polyols sont couramment utilisés dans l'industrie: les polyéthers et les polyesters (équation I-8). Les polyéthers représentent 80 à 90 % de la production [BER09]. Les matériaux de polyuréthane préparés à base de polyéther sont souples à basse température et ont une excellente résistance à l'hydrolyse. Cependant, leurs propriétés mécaniques sont beaucoup plus faibles que les matériaux de polyuréthane préparés à base de polyester. Les polyesters sont généralement plus chers que les polyéthers. Les polyesters ont une mauvaise résistance à l'hydrolyse, mais offre une meilleure résistance à la traction, à la flexion et à l'abrasion.



(I-8)

• Adjuvants

Les adjuvants peuvent jouer un rôle important dans la synthèse des polyuréthanes. Ils sont de nombreux types tels que les catalyseurs, les allongeurs de chaînes, les réticulants, les agents d'expansions, les durcisseurs, les stabilisants et analogues etc. [DEN12]. Les catalyseurs sont des accélérateurs de réactions chimiques et ils peuvent réduire le temps de réaction et améliorer l'efficacité de la production. Les allongeurs de chaînes sont les composés contenant deux groupes fonctionnels. Par la réaction d'allongement, il peut être généré des polymères

linéaires. Les réticulants généralement composés par les oligomères trifonctionnel ou tétrafonctionnel tels que les triols, tétrols, etc., produisent une structure en réseaux de polyuréthane réticulé.

Les différents composants du polyuréthane sont donnés par la figure I-3.

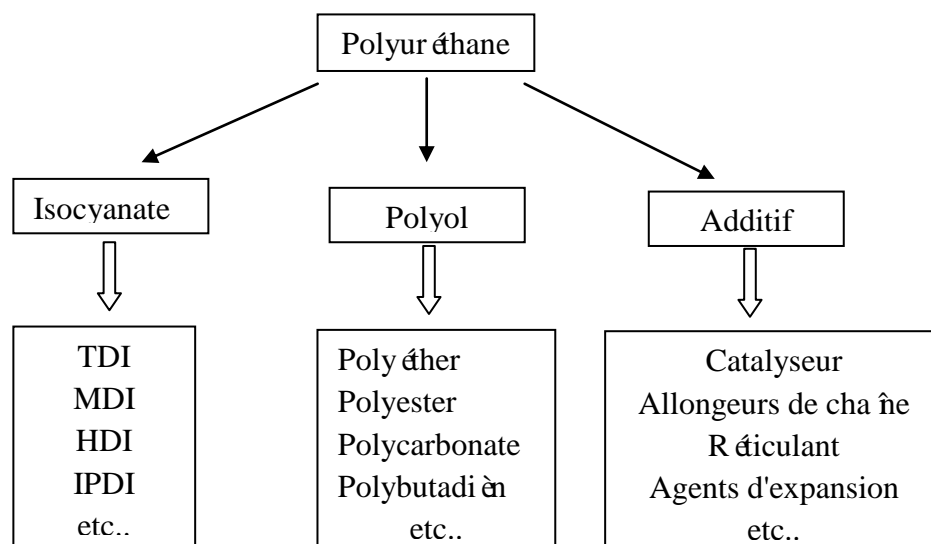


Figure I-3: Composés du polyuréthane

1.1.2 Méthodes de formulation

La formation de la mousse de polyuréthane peut être divisée en trois méthodes qui sont les suivantes: la méthode "Pré-polymère", la méthode "Quasi pré-polymère" et la méthode "One shot". [SZY99, BLA74, BIK09].

- **Procédé de prépolymère**

La méthode "Pré-polymère", également appelé procédé en 2 étapes, consiste à faire réagir l'isocyanate (en excès) avec le polyol dans un premier temps pendant la formulation. Le prépolymère est ensuite ajouté à l'eau, à des catalyseurs, des agents moussants et d'autres additifs qui sont mélangés sous agitation à grande vitesse. De nombreuses mousses de polyuréthane sont préparées par cette méthode car elle permet d'assurer la réaction complète des fonctions isocyanate avec les polyols et de contrôler facilement les propriétés physicochimiques du polymère par changement des quantités des composants qui sont ajoutés au prépolymère.

- **Procédé de "Quasi pré-polymère"**

La méthode de "Quasi pré-polymère" consiste à élaborer un prépolymère diisocyanate en utilisant moins de polyol que dans un prépolymère traditionnel. Dans cette méthode, une partie du polyol prévu est utilisée dans la première réaction avec les isocyanates, et ensuite une autre portion du polyéther ou polyester et de l'eau, des catalyseurs, d'autres additifs sont ajoutés.

- **Procédé de “One shot”**

Pour des raisons de productivité, la méthode de “One shot” consiste à faire la réaction en une seule étape. Ce procédé consiste à mélanger tous les composants (isocyanates, polyols, catalyseurs, eau, solvants volatiles etc.) en même temps dans la formation. Les réactions sont très exothermiques et peuvent durer entre 2 et 30 minutes. Le risque de dégradation des fonctions uréthane peut se produire si l'exothermie dépasse la plage de température 170-210 °C [DIE87]. De plus, il peut être difficile de mélanger tous les composants au même moment à cause des réactions entre les différents composants. Pour résoudre ce problème, il est préférable de réduire au maximum le nombre d'ingrédients participant à la formation.

1.1.3 Méthodes de fabrication

En général, les mousses souples de polyuréthane sont réalisées en introduisant une phase gazeuse dans le polymère liquide par chauffage ou par voie chimique. Les processus de moussage de la mousse polyuréthane peuvent être divisés en trois étapes [DAW82]: la nucléation de petites cellules dans le polymère liquide, la croissance des cellules à un volume souhaité et la stabilisation de la structure.

Le processus de fabrication des mousses de polyuréthane se déroule comme suit : tout d'abord des bonnes proportions de polyol, d'isocyanate et d'agent gonflant sont mélangées. Ensuite, deux principales réactions auront lieu: la réaction de soufflage et la réaction de gélification. Si la réaction de gélification se produit trop rapidement, une mousse à cellules fermées peut être obtenue. Par contre, si la réaction de production de gaz se produit trop rapidement, les cellules peuvent s'ouvrir avant que le polymère ait assez de force pour faire respecter la structure cellulaire, entraînant l'effondrement de la mousse. Les deux réactions doivent être maintenues en équilibre de façon à obtenir le produit désiré.

Il existe deux principales méthodes de mise en œuvre de la production de mousses souples de polyuréthane: la fabrication par “coulée souple” et la fabrication par “moulage par injection” [PEL12].

Le procédé “coulée souple” est une méthode de fabrication des mousses de polyuréthanes industrielles et elle consiste à fabriquer de grands blocs de mousse. Les mélanges liquides sont déposés en continu par un équipement de coulée sur une bande transporteuse. Dans le début du processus de fabrication, la réaction est très rapide. La vitesse de la bande transporteuse est fonction de la vitesse de coulée. Les mousses produites peuvent rapidement atteindre plusieurs mètres de longueur et de largeur tout en conservant une assez bonne homogénéité de la taille des cellules et de la densité. La réaction est fortement exothermique, et en quelques heures, la température interne du bloc peut atteindre 140-150°C. Les blocs sont ensuite stockés pendant un minimum de 24 heures pour achever la polymérisation. Ils pourront ensuite être découpés en blocs plus petits ou en feuilles pour des produits tels que matelas, oreillers, coussins selon la forme souhaitée.

La méthode de “moulage par injection” est un procédé qui utilise un moule pour fabriquer les mousses. Elle est couramment utilisée pour fabriquer les petites pièces ou des pièces de formes complexes ou spécifiques. Cette méthode suit un procédé séquentiel : ouverture du

moule, injection de matières premières avec une tête d'injection dans le moule, fermeture du moule, expansion, et à la fin démoulage. Des évènements sont nécessaires afin que l'air s'échappe du moule. Comme les procédés de la méthode dite "coulée souple", il faut attendre quelques heures (normalement 24h) pour le mûrissement. Le défaut de cette méthode est la microstructure cellulaire de produit moins homogène que la méthode dite "coulée souple".

1.1.4 Structure alvéolaire de la mousse

La mousse de polyuréthane est une phase solide d'un polymère alvéolaire. Généralement, la structure alvéolaire de la mousse peut être étudiée suivant deux échelles: macroscopique et microscopique [ALA13, CHA04]. Cependant, il y a d'autres travaux de recherches récents [DEN12, PEL12] qui considèrent non seulement deux échelles mais trois échelles: macroscopique, mésoscopique et microscopique. Dans les études de Pellizzi [PEL12], l'auteur a présenté la structure moléculaire, la structure macromoléculaire et la structure macroscopique pour les mousses de polyuréthane. En effet, l'échelle moléculaire se concentre sur les chaînes moléculaires de polyuréthane. La structure macromoléculaire est l'étude de la composition moléculaire et l'organisation spatiale de la chaîne de polymère qui présente un rôle fondamental sur les paramètres de performance du polyuréthane. Donc, on peut dire que les structures moléculaires et macromoléculaires viennent de la structure microscopique. La structure de la cellule de la mousse de polyuréthane est la représentation tridimensionnelle d'une cellule en forme de dodécaèdre pentagonal (figure I-4a). Les cellules sont constituées par plusieurs faces et chacune est délimitée par un bord solide. Les bords formés par la rencontre de deux faces sont appelés arêtes. Ce sont les parties solides de la mousse. Une cellule est considérée comme cellule ouverte, lorsque ce sont des arêtes qui délimitent les cellules, ces arêtes se rejoignant en un sommet (figure I-4b), tandis que, une cellule est dite fermée, quand les faces des cellules sont fermées par des membranes (figure I-4c).

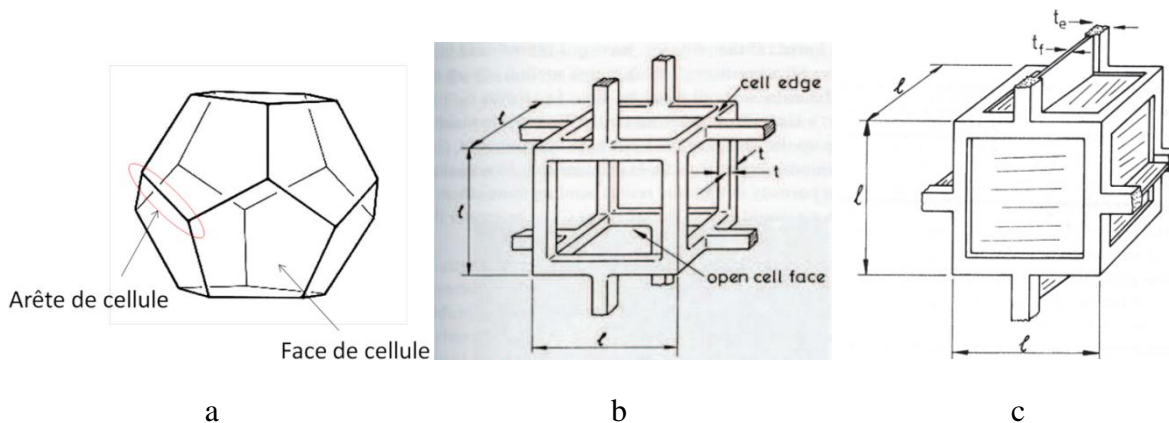


Figure I-4: Structure de la cellule de la mousse de polyuréthane :

- a, Structure de dodécaèdre pentagonal [PEL12] ; b, Modèle de cellule ouverte [GIB97] ; c, Modèle de cellule fermée [ZHU99, DEN12]

Selon la composition de la structure macromoléculaire de la mousse de polyuréthane, celle-ci forme une structure souple ou rigide (figure I-5). A l'échelle macroscopique, une mousse souple est constituée de 95% de cellules ouvertes, par contre, une mousse rigide est constituée de 90 à 95% de cellules fermées [TRO06].

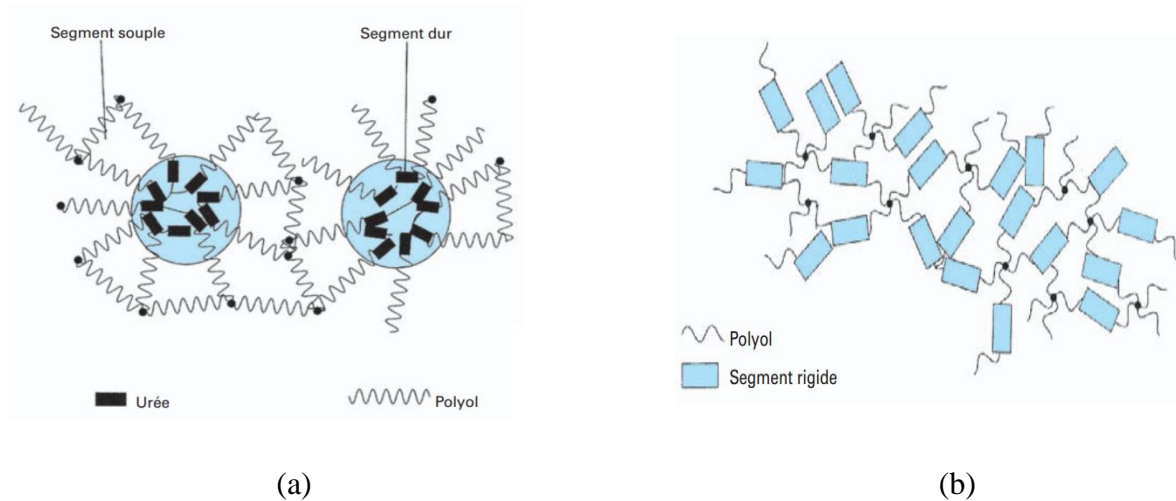


Figure I-5: Structure de mousse souple (a) et rigide (b) [BER09]

La compréhension de la structure macroscopique de la mousse de polyuréthane est principalement basée sur l'observation par microscopie électronique à balayage (MEB). Grâce à l'analyse au microscope électronique à balayage, il est largement admis que la structure cellulaire de la mousse de polyuréthane est à cellules ouvertes hexagonales ou à cellules fermées sphériques (figure I-6).

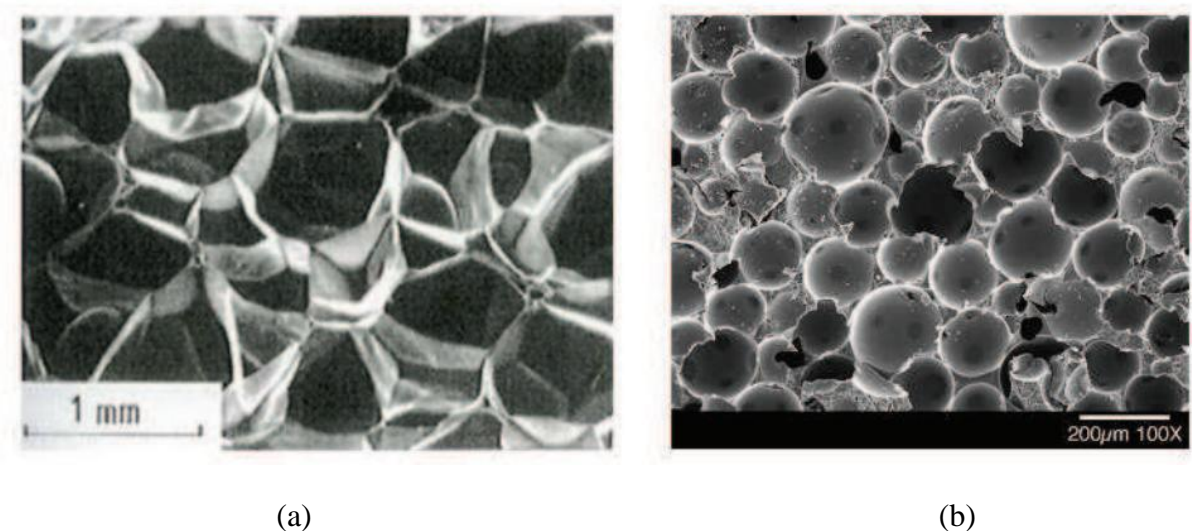


Figure I-6: Structure de mousse ouverte (a) [GIB97] et fermée (b) [SAI06]

Les images obtenues par MEB informent sur la structure d'une mousse polymère à travers l'épaisseur des arêtes, la morphologie et le diamètre des cellules. La figure I-6 illustre la différence entre la structure d'une mousse à cellules partiellement ouvertes et la structure d'une mousse à cellules fermées. Dans l'image I-6 (a), les cellules de la mousse présentent des arêtes bien formées avec un faible pourcentage de membranes solides minces, tandis que dans l'image I-6 (b), toutes les faces des cellules sont constituées par des membranes solides.

1.2 Caractérisation mécanique de la mousse

1.2.1 Paramètres influents

Les propriétés des mousses peuvent être attribuées à deux principaux paramètres : structurel et matériel [SIN00].

Les paramètres structurels comprennent ceux définissant la géométrie de la mousse tel les que la taille et la forme des cellules, la façon dont la matière est distribuée entre les bords de la cellule et des faces, et la densité relative ou la porosité. La densité relative a été considérée comme le paramètre structurel le plus important [VAN97, TAT99]. Il est défini par l'équation suivant :

$$\rho_R = \frac{\rho}{\rho_M} \quad (\text{I-9})$$

Où ρ_R est la densité relative, ρ est la densité du matériau alvéolaire et ρ_M est la densité du matériau solide constitutif.

La densité relative a un impact direct sur la résistance, la rigidité, l'amortissement, et les mécanismes de déformation des mousses.

La plupart des propriétés mécaniques et thermiques ne dépendent que faiblement de la taille des cellules. Cependant, la forme des cellules est un paramètre important.

Lorsque les cellules sont d'égales dimensions dans toutes les directions, les propriétés sont isotropes. Cependant, lorsque les cellules sont légèrement allongées ou aplaties alors les propriétés mécaniques sont anisotropes.

Gong et al. (2005) ont présenté les réponses de mousses de polyuréthane comprimées dans la direction perpendiculaire à la direction d'expansion ou dans la direction parallèle. Leurs résultats montrent qu'une mousse comprimée dans la direction perpendiculaire à la direction d'expansion a une valeur du module initial toujours inférieure à celle d'une mousse comprimée dans la direction parallèle, soit que la mousse de polyuréthane a des propriétés différentes suivant la direction comprimée [GON05].

Saha et al. (2005) ont aussi présenté que la limite d'élasticité et la hauteur du plateau (figure I-7) augmentent avec la densité de la mousse pendant les essais compression, par contre, l'élongation du plateau diminue [SAH05]. Donc, on peut dire que la mousse à haute densité résiste mieux aux contraintes appliquées que la mousse à faible densité. Cependant, la structure d'une mousse à haute densité atteint le régime de densification à de faibles déformations. Concernant les mousses rigides, au lieu d'observer une augmentation de la contrainte due à la densification, la valeur de contrainte diminue fortement à la fin du plateau.

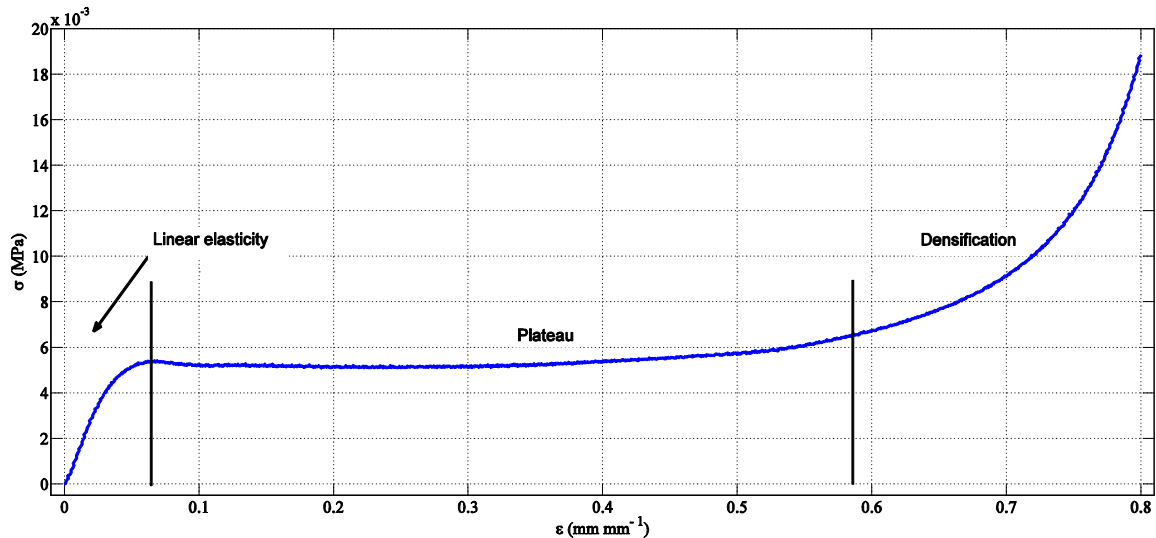


Figure I-7 Courbe de compression de la mousse polyuréthane

1.2.2 Tests statiques

Une pratique courante dans l'industrie est de caractériser le comportement de la mousse souple en mesurant sa réponse à plusieurs tests standard. Dans ces essais, la réponse de la matière dans des conditions spécifiques de chargement est mesurée, ce qui est utile lorsque l'on compare un échantillon à l'autre.

Il y a beaucoup de normes pour caractériser les propriétés des mousses de polyuréthane, telles que la norme ISO 3386 (International Organization for standardization), la norme JASO B 407-82 (Japanese Standard) [JAS82] et la norme américaine D3574-95 de L'ASTM (2005) (American Society for Testing and Material).

Une description des méthodes d'essai de la mousse est nécessaire pour comprendre les moyens par lesquels les caractéristiques des mousses sont évaluées. Trois types de comportement de mousse sont généralement étudiés: la réponse statique, la réponse quasi-statique et la réponse dynamique.

Une charge statique est indépendante du temps. Une charge quasi-statique est fonction du temps. Une charge fonction du temps pour laquelle les effets d'inertie ne peuvent être ignorés, est dite dynamique.

Les tests statiques sont essentiellement des essais de fluage et de relaxation. Le principe d'un essai de fluage est d'appliquer une force ou une contrainte constante σ_0 dans le temps, à une température donnée, et de suivre tout au long de l'essai l'évolution de la déformation comme le montre la figure ci-dessous.

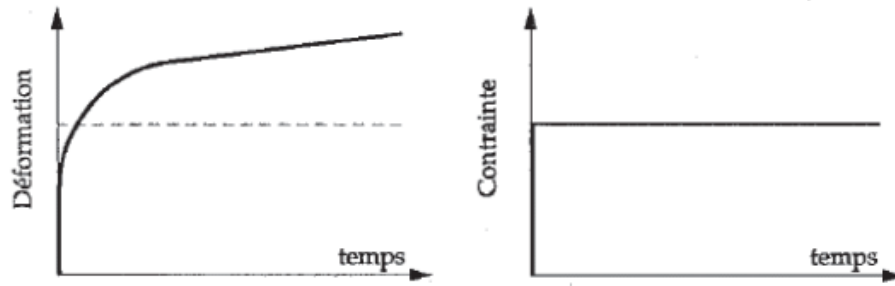


Figure I-8 Essai de fluage [OUD93]

Parce que la contrainte σ_0 est constante, la complaisance de fluage $D(t)$ peut être définie par la formulation :

$$D(t) = \varepsilon(t) / \sigma_0 \quad (\text{I-10})$$

Un essai de fluage est généralement suivi d'un essai de recouvrance qui consiste à continuer à suivre l'évolution temporelle de la déformation après élimination de la contrainte σ_0 appliqué en fluage.

Un essai de relaxation (figure I-9) est l'essai dual de fluage. L'échantillon de mousse est soumis à une déformation constante ε_0 (échelon de déformation), et l'évolution de la contrainte $\sigma(t)$ est suivi au cours du temps.

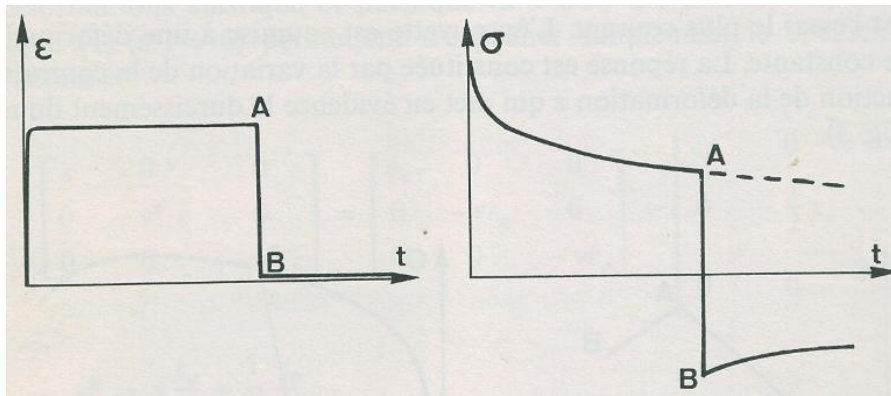


Figure I-9 Essai de relaxation [LEM04]

Le module de relaxation en fonction du temps est donné par l'équation :

$$E(t) = \sigma(t) / \varepsilon_0 \quad (\text{I-11})$$

Lorsqu'il n'y a pas de déformation visqueuse irréversible, la valeur de $E(t)$ tend vers une constante $E(\infty)$ que l'on appelle le module relaxé.

1.2.3 Tests quasi-statiques

On peut dire qu'un essai est quasi-statique ou dynamique selon la vitesse de déformation. Deng [DEN04] et Jmal [JMA12] affirment que la vitesse limite pour le type de mousse de

polyuréthane est de l'ordre de 10^{-2} sec^{-1} . C'est-à-dire que tous les essais à vitesse de déformation inférieure à cette vitesse limite sont des études dites quasi-statiques et tous les essais à vitesse de déformation supérieure à cette vitesse limite sont des études dynamiques.

1.2.3.1 Essais de compression/décompression

Pour les matériaux alvéolaires tels que les mousses de polyuréthane, les propriétés mécaniques sont souvent caractérisées par des tests de compression suivis d'une décompression. Les échantillons sont couramment comprimés entre les deux plateaux de compression de l'appareil jusqu'à une déformation souhaitée (Figure I-10). L'échantillon subit ensuite une décompression jusqu'au retour à la position initiale.

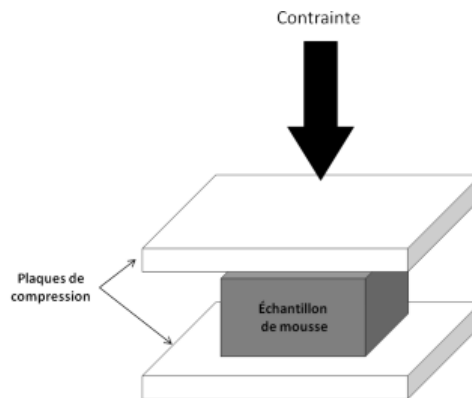


Figure I-10 Représentation d'un essai de compression /décompression [PEL12]

Dans notre travail, nous avons travaillé sur l'essai de compression/décompression de la mousse de polyuréthane. Un exemple de courbe expérimentale de contrainte-déformation en compression/décompression est donné par la figure I-11.

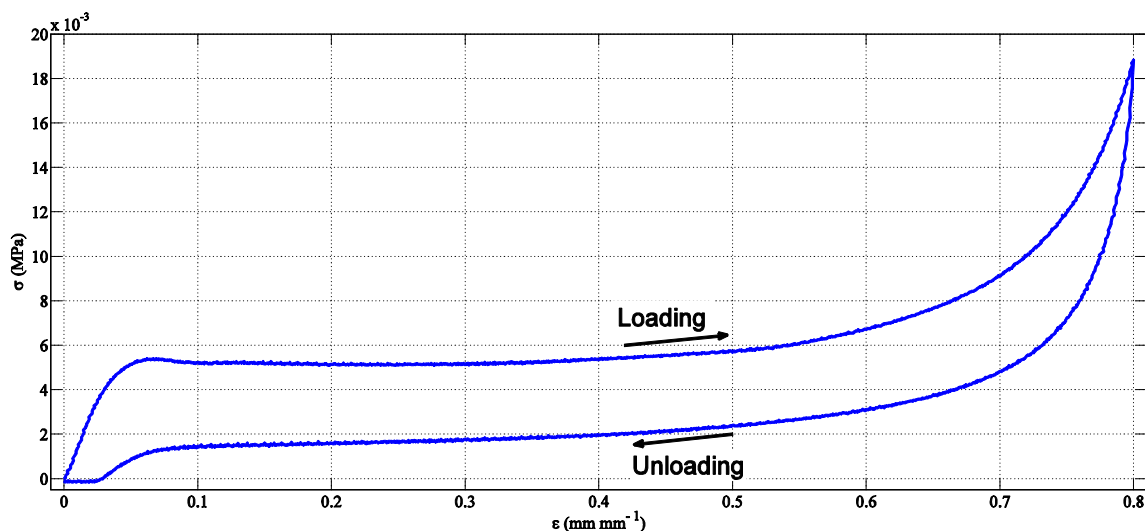


Figure I-11 Courbe d'un essai de compression/décompression d'une mousse polyuréthane

Les courbes de compression/décompression de contrainte-déformation de la mousse de polyuréthane (Figure I-7 et I-11) montrent les trois régions de déformation typiques à savoir la région linéaire, la région plateau et la région de densification. Dans la partie de la région linéaire qui correspond à la zone hyperélastique, la déformation de l'échantillon de la mousse

est réversible et cette partie ne dépasse généralement pas 5%. La forme de la courbe pendant la région linéaire est la même pour les mousses à cellules ouvertes et les mousses à cellules fermées [GON05]. Lorsque les déformations augmentent, la courbe dépasse la limite d'élasticité et présente un long plateau à contrainte presque constante. La cause de ce phénomène est la rupture des parois des cellules intérieures dans la mousse de polyuréthane. Dans la dernière région dite de densification, la résistance de la mousse augmente rapidement à cause des parois des cellules qui entrent en contact les unes avec les autres.

La décompression ne suit pas le même chemin de compression, d'où la présence d'une hystérésis qui peut être expliqué par le comportement viscoélastique des mousses de polyuréthane. L'aire de l'hystérésis caractérise l'énergie absorbée par les mousses lors d'un cycle de compression/décompression : une information très intéressante pour quantifier le confort quasi-statique des mousses de polyuréthane.

1.2.3.2 Essais d'indentation

Rizov et al. [RIZ05] ont présenté des études d'indentation de panneaux composites en sandwich de mousse (Figure I-12a). Belouettar et al. [BEL06] ont travaillé sur la modélisation d'un siège typique de voiture par des essais d'indentation (figure I-12b). Li et al. [LI09] ont utilisés tests d'indentation pour la caractérisation des paramètres non linéaires des mousses.

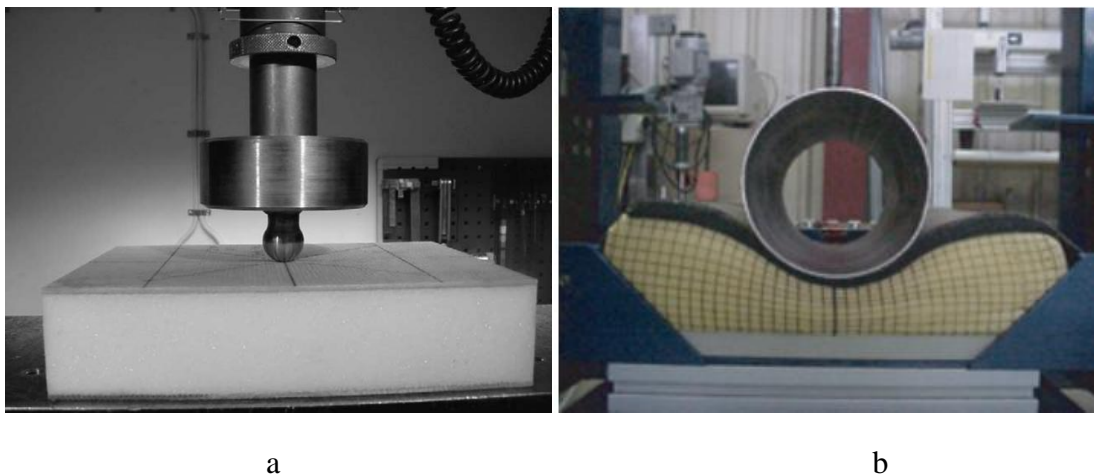


Figure I-12 Dispositif d'essai d'indentation. a. test d'indentation de base panneaux sandwich composites [RIZ05]; b. test d'indentation d'un siège de voiture [BEL06]

Flores-Johnson et al. ont présenté un ensemble de données expérimentales sur les comportements en indentation d'une gamme de mousses polymères [FLO10]. Enfin, des simulations numériques de l'indentation quasi-statique dans les mousses polymères ont été développées par plusieurs auteurs [GIL01, RIZ07].

1.2.3.3 Essais de cisaillement

Les essais de cisaillement sont décrits sur la figure I-13. Figure I-13a montre que le mouvement uniaxial se traduira par une charge de cisaillement à partir des deux extrémités de l'éprouvette. Cela garantit que l'échantillon soit aligné à la ligne centrale. Les extrémités de l'échantillon ont été collées pour assurer une déformation uniforme.

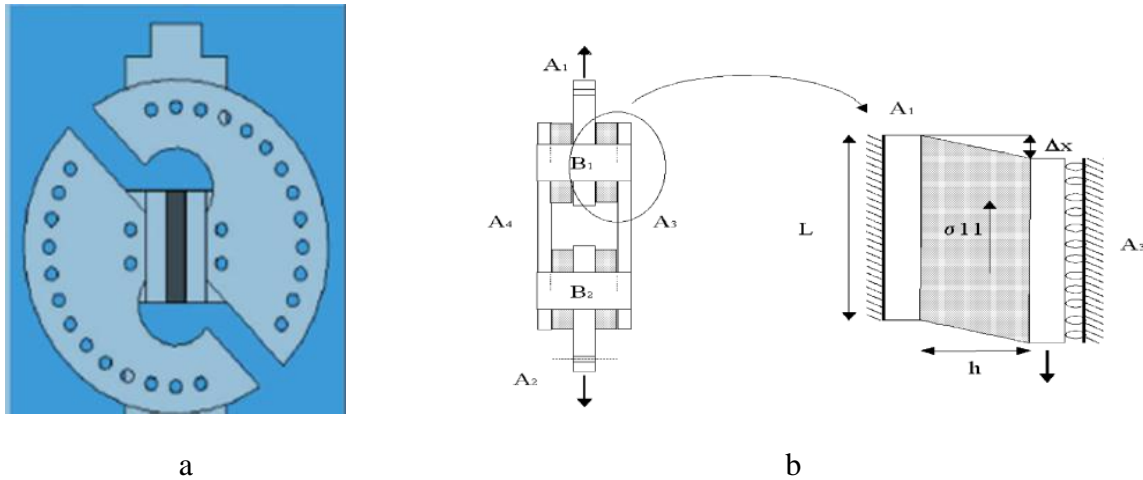


Figure I-13 Dispositif expérimental de cisaillement. a. dispositif cisaillement simple [LI09];
b. dispositif quadruple cisaillement [PRU00]

Figure I-13b présente un autre essai de cisaillement où les quatre échantillons de mousse sont collés entre quatre plaques métalliques (plaques A1, A2, A3 et A4) maintenues à distance fixe grâce à quatre autres plaques métalliques (plaques B1, B2, B3 et B4). Un déplacement est imposé sur les deux plaques métalliques intérieures (plaques A1 et A2) imposant ainsi un état de cisaillement simple aux quatre échantillons de mousse [PRU00].

Enfin, Manalo [MAN13] a utilisé l'essai de cisaillement pour déterminer les propriétés mécaniques de mousses rigides, alors que Sabuwala et al. [SAB13] ont mis en œuvre un essai de cisaillement combiné avec de la compression.

1.2.4 Test dynamiques

Dans les essais dynamiques, le comportement mécanique est fortement affecté par le fluide enfermé dans la mousse de polyuréthane. Les propriétés dynamiques sont également fonction du niveau de compression initial de la mousse, autour duquel le test dynamique est effectué [HIL91]. Les principaux essais sont le test de rebondissement ASTM pour évaluer la compétence à absorber l'énergie de déformation et le test 'masse libre' pour évaluer les réponses dynamiques de la mousse. Il existe encore d'autres types de tests qui sont détaillés dans les travaux de Gibson [GIB94] et les travaux de Herrington [HER97].

1.2.4.1 Tests de rebondissement

Le test de rebondissement permet de mesurer les propriétés de la mousse, telles que la rigidité et d'évaluer l'énergie absorbée par la mousse. Le dispositif d'essai est présenté par figure I-14. Ces essais consistent à laisser tomber une balle métallique d'une hauteur déterminée sur l'échantillon de mousse, et à mesurer la hauteur du rebond. L'énergie absorbée par les échantillons de la mousse est estimée par la différence entre la hauteur, suite à son premier rebond et la hauteur initiale [TU08].

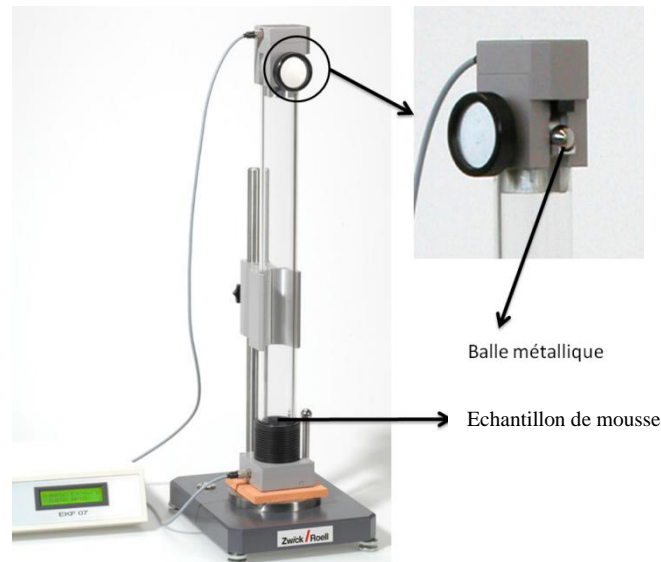


Figure I-14 Dispositif de test de rebondissement (www.zwick.de)

Le test de rebondissement dépend essentiellement de la verticalité de l'appareil par rapport à la surface de la mousse qui doit être horizontale [FRA05]. Un manque de verticalité pouvant entraîner des frottements entre la bille métallique et le tube de guidage.

1.2.4.2 Tests 'masse libre'

La figure I-15 présente une schématisation de l'essai de type 'masse libre'. Dans la figure I-15, $X(t)$ représente la réponse en déplacement au dessus de la mousse, également appelé déplacement transmis à la masse. $Y(t)$ représente le déplacement au dessous de la mousse, également appelé déplacement d'excitation.

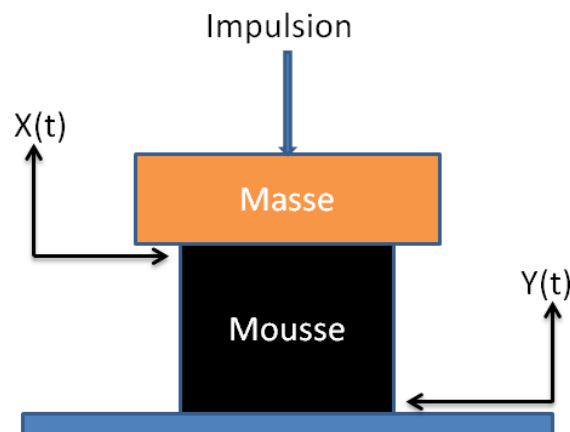


Figure I-15 Schématisation d'un essai 'masse libre'

La configuration 'masse libre' représentée sur la figure I-16 est souvent utilisée pour évaluer la réponse dynamique de la mousse. L'excitation est située au niveau de la base et on mesure la réponse de la masse.

La configuration 'masse libre' s'inspire d'une norme japonaise (JASO B 407-2) sur les essais de la mousse de le siège de voiture. En effet, il existe une controverse dans l'essai dynamique pour déterminer si l'excitation de la base est à déplacement constant ou à accélération

constante lorsqu'on fait varier la fréquence. La norme JASO prescrit l'utilisation d'un déplacement constant, ce qui implique que l'amplitude de l'accélération va augmenter avec le carré de la fréquence [JMA12, SIN00].

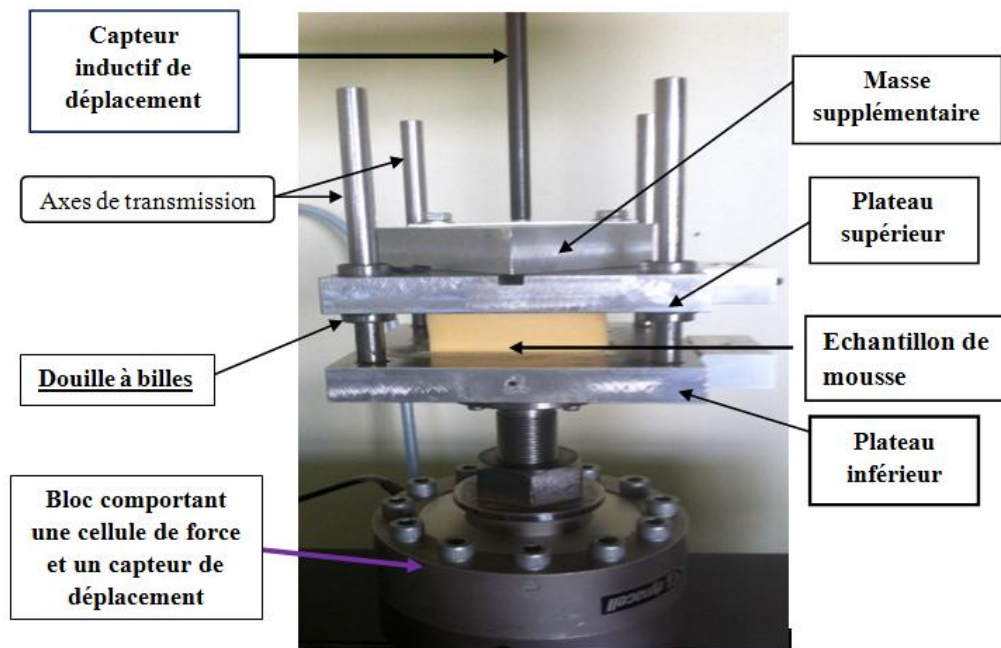


Figure I-16 Dispositif de test 'masse libre' [JMA12]

En utilisant le dispositif dans la figure I-16, Jmal [JMA12] a montré que le comportement dynamique de la mousse est influencé par des frottements intrinsèques au dispositif. Ces frottements sont à la fois de types visqueux et secs. Afin de minimiser leurs influences, il a développé un nouveau dispositif d'essai dont la transmission du mouvement est assurée par des paliers sans contact (paliers à air) (Figure I-17). Les résultats des tests 'masse libre' ont montré que le comportement vibratoire de la mousse est non linéaire. En fait, il dépend de l'amplitude d'excitation et de la masse initialement placée au-dessus de l'échantillon. Il a montré également que le pouvoir d'atténuation des vibrations de la mousse de polyuréthane dépend de la fréquence d'excitation, de l'amplitude d'excitation ainsi que de l'état de compression quasi-statique initial donné par la masse de l'occupant du siège de voiture. Enfin, il a mis en place une fonction de transfert analytique de 'raideur-dynamique' permettant de prévoir le comportement vibratoire de la mousse quelles que soient les conditions de sollicitation en 'masse libre'.

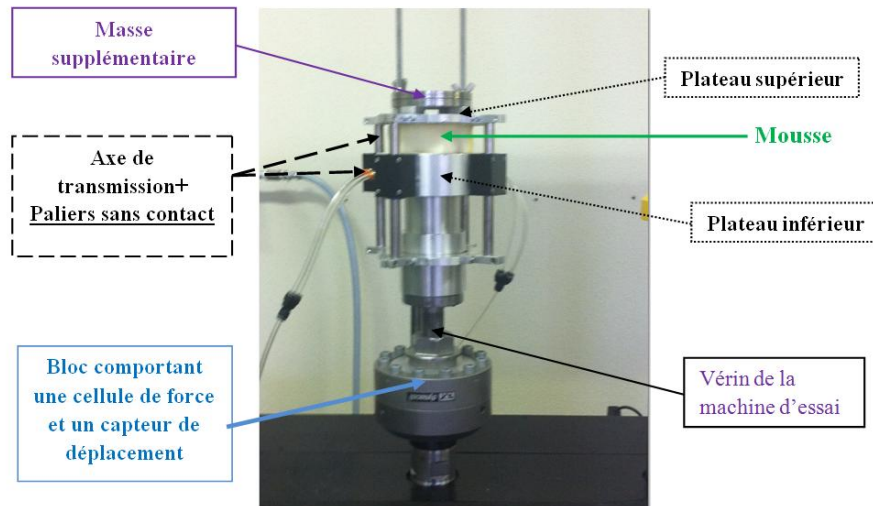


Figure I-17 Dispositif d'essais dynamiques [JMA12]

Dans un véhicule automobile, l'excitation à des fréquences plus élevées est typiquement avec un déplacement plus faible qu'à basses fréquences, donc on peut penser qu'une excitation à accélération constante serait plus appropriée pour l'évaluation des mousses de sièges de voiture.

1.2.5 Comportement mécanique de la mousse

Cette section a pour objectif de faire un point sur le comportement mécanique de matériaux tels que la mousse de polyuréthane. La mousse de polyuréthane présente à la fois un comportement hyperélastique et un comportement viscoélastique pendant un essai de compression /décompression sous grande déformation. Dans le cas d'un solide élastique, la contrainte est liée à la déformation par la loi de Hooke, qui peut être donnée par l'équation suivante :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{I-12})$$

Où E est le module d'Young, σ la contrainte et ε la déformation.

Pour le fluide visqueux, la réponse est donnée par la loi de Newton :

$$\sigma = \eta(d\varepsilon/dt) \quad (\text{I-13})$$

Où η est la viscosité

Cependant, le comportement viscoélastique est entre ces deux échelles, c'est-à-dire qu'un comportement viscoélastique contient une partie de comportement hyperélastique et une partie de comportement visqueux. La comparaison ces trois réponses est donnée par la figure I-18.

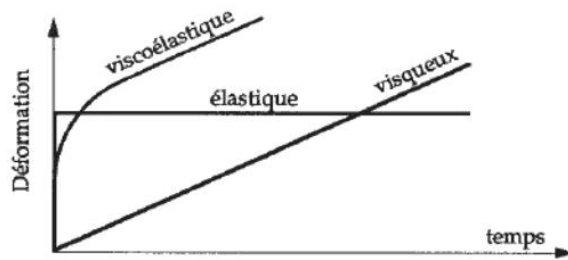


Figure I-18 Comportement hyper élastique, visco élastique et newtonien [OUD94]

Par rapport à la définition ci-dessus, un matériau est dit viscoélastique si l'état actuel de la réponse dépend non seulement de l'état actuel de chargement, mais aussi sur les états antérieurs [HAD95]. Ainsi, la mousse de polyuréthane présente des phénomènes de fluage, d'hystérèse, de dissipation et de ramollissement lors de l'essai compression/décompression. Pour préciser le comportement mécanique de la mousse de polyuréthane, nous allons détailler 3 aspects principaux que sont le comportement hyper élastique, le comportement visco élastique et l'effet des Mullins.

1.2.5.1 Comportement hyper élastique

Un matériau hyperélastique est par définition un matériau non dissipatif dont l'énergie de déformation par unité de volume initial ne dépend que de l'état actuel des déformations du matériau [CHA11]. L'hyper élasticité se définit par un comportement hyper élastique dérivant d'une énergie de déformation W permettant d'écrire la loi de comportement sous la forme :

$$\bar{\bar{S}} = -p\bar{\bar{C}}^{-1} + 2\frac{\partial W}{\partial \bar{\bar{C}}} \quad (\text{I-14})$$

Où $\bar{\bar{S}}$ est le second tenseur de contrainte de Piola-Kirchhoff, p est la pression hydrostatique, inconnue permettant de prendre en compte l'incompressibilité, et $\bar{\bar{C}}$ le tenseur de dilatation de Cauchy green droit.

La mousse de polyuréthane est un matériau qui présente un comportement hyper élastique sous grande déformation lors de l'essai compression/décompression. Comme le montre la figure I-7, la courbe contrainte-déformation indique que le matériau se comporte de façon linéairement hyper élastique avec une pente égale au module de Young de la matière lors de faibles déformations. Dans cette région, l'élasticité linéaire est contrôlée par le bombage du mur de la cellule. Lorsque la charge augmente, on voit apparaître un plateau de contrainte. Cette contrainte est à peu près constante en raison de l'effondrement des cellules de la mousse. En fonction des propriétés mécaniques des parois cellulaires, il peut être provoqué par le flambage élastique ou plastique [XUE03]. Comme les parois cellulaires continuent à s'effondrer, les parois cellulaires opposées se rencontrent et se touchent. Ceci cause une augmentation très rapide de la contrainte : c'est la zone de densification.

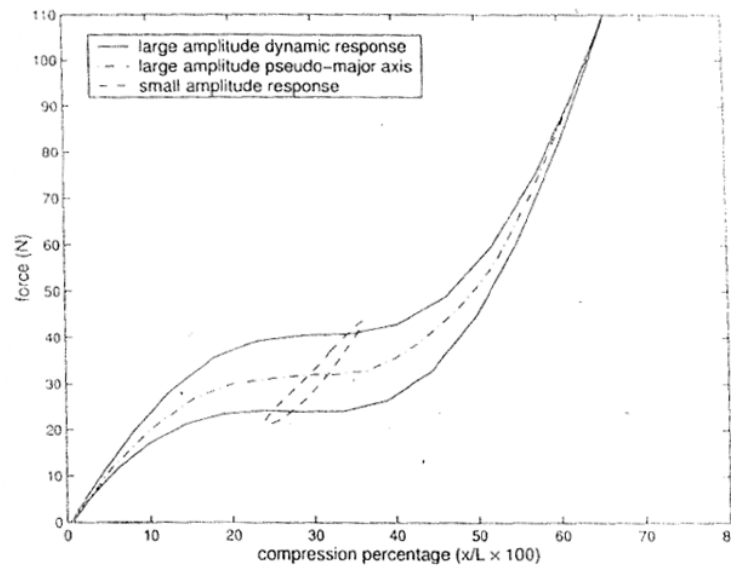


Figure I-19 Réponse en force de la mousse de polyuréthane dans le cas de faibles et grandes amplitudes de vibrations [WHI98]

L'hyper élasticité non-linéaire est un aspect important du comportement de la mousse de polyuréthane. Les non-linéarités peuvent être issues du comportement non linéaire qui existe à l'échelle atomique ou moléculaire. Elles peuvent aussi être dues à l'effet de nombreux défauts qui sont assez grands pour être modélisés en utilisant la mécanique des milieux continus locaux tels que des microfissures ou des dislocations distribuées [SIN00]. Sur une échelle macroscopique, les non-linéarités peuvent être observées comme un phénomène géométrique. Dans les études de Smardzewski [SMA08], ils ont présenté les comportements hyper élastiques de la mousse de polyuréthane de meubles. Dans son étude, White [WHI98] compare deux courbes force-déplacement (figure I-19) autour d'un niveau de chargement initial de 30%. La mousse est excitée autour de ce niveau de chargement, pour une faible et une forte amplitude. Pour de très grandes amplitudes, la boucle d'hystérésis a été modifiée de sa forme quasi-elliptique à une forme hautement déformée. Un axe pseudo-majeur de cette courbe de grande amplitude peut être utilisé pour représenter la "raideur" de cet état dynamique. Ce comportement reflète le comportement fortement non linéaire que les mousses souples présentent sous l'influence de grandes forces [WHI00].

1.2.5.2 Comportement visco élastique

Un autre aspect essentiel du comportement de la mousse de polyuréthane est la propriété de visco élasticité. Une caractéristique principale de matériaux visco élastiques est l'influence des états précédents de déformation sur l'état de contrainte actuel [YAN04], donc de l'histoire de déformation. Les matériaux visco élastiques sont caractérisés par un certain degré de rigidité d'un corps hyper élastique, mais dans le même temps, ils ont une capacité à dissiper de l'énergie par des pertes de frottement et se comportent comme un fluide visqueux. Les théories classiques de l'élasticité linéaire et des fluides newtoniens ne peuvent pas décrire de façon adéquate le comportement de la plupart des matériaux.

Le comportement intermédiaire ou mixte, appelé visco élasticité, existe dans la plupart des matériaux réels, en particulier pour les mousses de polyuréthane. Le comportement de ces

matériaux est caractérisé par une dépendance au temps, c'est-à-dire que la contrainte dépend à la fois de la déformation, de la vitesse de déformation, ainsi que des dérivées de la déformation d'ordre plus élevé par rapport au temps [FER80].

Les symptômes de la viscoélasticité apparaissent de diverses manières. Quand un matériau viscoélastique est soumis à une contrainte constante, sa déformation varie au cours du temps jusqu'à une position d'équilibre, et est dictée par sa structure cellulaire. Si la charge est retirée, le matériau ne recouvre pas instantanément, mais présente plutôt une déformation résiduelle instantanée, dont la grandeur dépend de la durée pendant laquelle la charge est appliquée, et sur le niveau de chargement. Après le retrait de la charge, une réduction notable de la quantité de déformation résiduelle s'effectue progressivement avec le temps, et la contrainte résiduelle peut même disparaître complètement. Ce phénomène de réduction de la souche est appelé 'reprise de fluage'. Lorsque le matériau est soumis à déformation constante, la contrainte nécessaire pour maintenir cette déformation diminue progressivement, ce phénomène est connu comme 'relaxation des contraintes'. En outre, quand un matériau viscoélastique est soumis à une contrainte sinusoïdale oscillante, la contrainte et la déformation ne sont ni exactement en phase, ni en opposition de phase [SIN00].

L'amplitude et l'angle de phase du rapport entre la contrainte et la déformation sont généralement dépendants de la fréquence et de la température. Lors du chargement et du déchargement d'un échantillon de matériau viscoélastique, une partie de l'apport d'énergie est stockée et diminue dans chaque cycle et une partie d'énergie est dissipée sous forme de chaleur.

La nature particulière de la réponse viscoélastique, tel que décrit ci-dessus, indique l'existence d'une propriété de « résistance passive » dans ces matières. Le comportement observé dans des expériences, comme le fluage, la relaxation des contraintes et l'atténuation intrinsèque et la dispersion des ondes se propageant, sont toutes les manifestations de cette propriété de résistance passive. Grâce à cette résistance passive, le matériau est dit posséder de la « mémoire », qui est essentiellement une manifestation de la nature viscoélastique de mousse.

1.2.5.3 Effet de Mullins

Le comportement mécanique de la mousse de polyuréthane est modifié après l'application de la première compression ou extension. Cette première sollicitation entraîne une perte de rigidité pour les déformations suivantes et une déformation résiduelle (figure I-20). C'est-à-dire que pour une même déformation, la contrainte dans le premier cycle est moins faible que la contrainte dans les cycles suivants. Ce phénomène est appelé effet Mullins [MUL69].

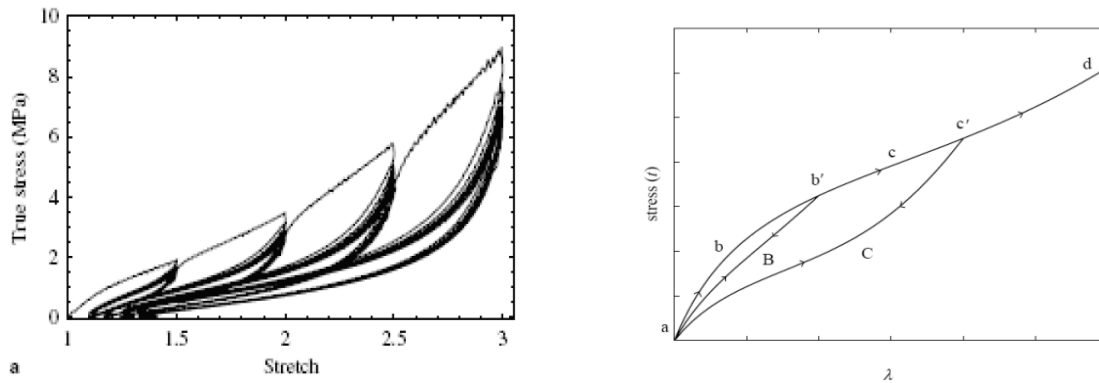


Figure I-20 Effet de Mullins [WHI98]

Les mousses de polyuréthane sont caractérisées par leur capacité à subir de grandes déformations hyperélastiques. Leurs comportements soulignent l'apparition de ramollissement, d'hystérésis et de ramollissement cyclique. Il est communément admis que l'effet Mullins est le résultat d'une évolution dans le domaine des microstructures dures et molles dans lequel la fraction volumique effective des domaines mous augmente avec l'étirement ou le résultat de dommages irréversibles dans le matériau ou la combinaison des deux. L'hystérésis mécanique est généralement attribué à des changements irréversibles tels que le désenchevêtrement des chaînes ou la déformation plastique, craquelures, amorces de fissure, ruptures de la liaison, et même des changements morphologiques telles que la cristallisation et/ou d'autres processus viscoélastiques. L'hystérésis et la contrainte de ramollissement cyclique sont souvent considérées comme le résultat de l'effet de relaxation des contraintes. Sur la base de la structure physique des élastomères chargés, la présente étude montre que l'effet Mullins, l'hystérésis et l'adoucissement cyclique peuvent être modélisés par des phénomènes de friction dissipatifs en raison du coulisement interne des chaînes macromoléculaires et du coulisement des chaînes de liaison sur les particules de charge de renforcement. Dans les mousses de polyuréthane, l'hystérésis provient également de la perturbation et de la déformation des domaines principalement par rupture des liaisons hydrogène. Plusieurs explications micromécaniques ont été données sur cet effet Mullins. Par exemple, le modèle proposé par Ogden [OGD99] pour l'effet Mullins et l'extension de ce modèle pour le comportement hyperélastique jusqu'aux déformations permanentes par Dorfmann [DOR04] sont des approches phénoménologiques, où la structure physique de la matière ne sont pas prises en compte.

1.3 Modélisation du comportement mécanique des mousses

Le comportement mécanique de la mousse, selon le contexte et les conditions de chargement, peut être décrit par différents modèles. L'objectif des nombreuses études de modélisation est de lier la structure moléculaire et les propriétés physiques aux caractéristiques mécaniques. En fonction de l'application spécifique et du polymère étudié, les dimensions de l'échantillon modélisé peuvent varier de 10^{-10} à 0.1 m. Les techniques de modélisation changent également en fonction de l'échelle du modèle. Aux plus petites échelles, elles sont basées sur la mécanique des milieux continus, et à grande échelle, sur des modèles empiriques dérivés d'une étude quantitative des propriétés structurelles [POR96]

Généralement, deux méthodes sont couramment utilisées pour la modélisation du comportement de la mousse de polyuréthane: la modélisation micromécanique et la modélisation macromécanique. Cette partie est dédiée à la présentation de ces deux approches.

1.3.1 Les modèles micromécaniques

En ce qui concerne la partie moléculaire, les modèles micromécaniques considèrent généralement les composants de la structure de la mousse tels que la forme des cellules, les supports des cellules et les parois.

Les modèles micromécaniques de mousse qui sont basés sur la structure cellulaire ont permis de relier les propriétés mécaniques des mousses à la forme et la taille de leurs cellules et leur topologie [SIN00]. Parmi les modèles, les plus simples sont ceux basés sur des assemblages de solides réguliers, emballages symétriques d'entrelacs, comme des prismes rectangulaires [WAR88, WAR91], dodécaèdre [WEA94] et tétraèdre [CHR00, ZHU97].

Gibson and Ashby [GIB97] ont considéré des cellules de forme cubique pour développer un modèle micromécanique capable de déterminer le module d'Young de la mousse. Ils ont montré que ce dernier dépend du module d'Young de la matrice polymère, de la densité relative de la mousse et du niveau de compression. Comme ce modèle, Warren W.E. et Kraynik A.M [WAR88] ont présenté un modèle similaire pour une forme de cellules cubiques. Ces deux modèles micromécaniques ont mis en évidence la forte relation entre la microstructure et les propriétés hyperélastiques de la mousse.

De nombreux autres modèles micromécaniques sont proposés pour la modélisation du comportement du matériau dans la littérature [WAR91, ZHU97].

Certaines théories ont été avancées pour expliquer les mécanismes d'amortissement, l'apparition de la fatigue, et le comportement de fluage des mousses en termes de propriétés des micro-échelles.

Huang et Lin [HUA96] ont analysé la fatigue des mousses en utilisant la théorie du défaut matériel. Ils ont mis en place des relations entre la fatigue cyclique, la gamme des contraintes, la taille des cellules, la densité relative et les paramètres de fatigue de la matière solide.

En conclusion, les modèles micromécaniques permettent d'estimer le comportement non linéaire quasi-statique et de développer des relations qui relient les propriétés géométriques des cellules aux propriétés hyperélastiques de la mousse.

1.3.2 Les modèles macromécaniques

Contrairement aux modèles micromécaniques où l'on part de la modélisation de la cellule pour caractériser un échantillon de mousse de polyuréthane, le modèle macromécanique consiste à étudier la réponse entière d'un échantillon pour l'estimation des propriétés macromécaniques du matériau telles que la raideur quasi-statique, le module d'Young global, la raideur dynamique et le coefficient d'amortissement. Pour de nombreuses applications à grande échelle, tels que le comportement mécanique de la mousse des sièges, des modèles macromécaniques sont suffisants. Nous allons présenter trois types de modèles à savoir les modèles hyperélastiques (hyperélastiques), les modèles viscoélastiques et les modèles à mémoire.

1.3.2.1 Les modèles hyperélastiques

Une caractéristique de la mousse de polyuréthane en quasi-statique est son comportement hyperélastique non linéaire que l'on peut décrire par la théorie de l'hyperélasticité.

Celle-ci est issue de la mécanique des milieux continus [GOV97]. La plupart des modèles macromécaniques sont de nature phénoménologique. De nombreux modèles hyperélastiques sont proposés dans la littérature, nous allons en préciser quelques uns.

La plupart des modèles hyperélastiques sont utilisés à partir du développement en série de Taylor de la densité de l'énergie de déformation W donnée par l'équation 1-15.

$$W = \sum_{p,q,r} C_{p,q,r} W_{p,q,r} = \sum_{p,q,r} C_{p,q,r} (I_1 - 3)^p (I_2 - 3)^q (I_3 - 3)^r \quad (\text{I-15})$$

Les invariants (I_1, I_2, I_3) sont fonction des déformations principales $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ (équation 1-16).

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (\text{I-16})$$

Le terme $C_{p,q,r}$ définit le facteur de pondération associé à la densité d'énergie élémentaire $W_{p,q,r}$ et (p, q, r) définissent respectivement l'ordre d'influence des invariants (I_1, I_2, I_3) sur la densité élémentaire.

- **Modèle de Mooney**

Mooney [MOO40] a proposé un modèle en partant du constat que le comportement du caoutchouc est linéaire en cisaillement simple. Il écrit la densité de l'énergie de déformation W sous la forme suivante

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + D_1(J - 1)^2 \quad (\text{I-17})$$

avec :

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= J^{-2/3} I_1; \quad I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \\ \bar{I}_2 &= J^{-4/3} I_2; \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2; \\ J &= \det(F)\end{aligned}$$

F est le tenseur de gradient de la déformation.

Ce modèle est bien adapté pour représenter les essais de Treloar [TRE44] sur le caoutchouc naturel pour des déformations modérées. Rivlin (1948) tente d'améliorer le modèle de Mooney en proposant une extension du modèle de ce dernier et il a posé W :

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} \left(\bar{I}_1 - 3 \right)^i \left(\bar{I}_2 - 3 \right)^j + \sum_{i=1}^N D_i (J-1)^{2i} \quad (\text{I-18})$$

En fait, si on prend $N = 1$ alors on retrouve l'équation I-17.

Ogden [OGD72] a proposé un modèle qui est donné par l'équation I-19 et peut s'exprimer en termes de déformations généralisées et introduit une forme mathématique en série de puissances réelles :

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3 \right) \quad (\text{I-19})$$

$$\sigma_i = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_i^{\alpha_n} \quad (\text{I-20})$$

avec $(\mu_i, \alpha_i)_{i=1..n}$ sont des paramètres caractéristiques du matériau.

Les paramètres du matériau sont déterminés à partir des études expérimentales basées sur des essais de compression uni-axiale et des essais de cisaillement.

Pour assurer une réponse physique raisonnable, il convient de vérifier qu'elle est définie positive pour toutes déformations non nulles. Finalement, il est suffisant de considérer :

$$\mu_n \alpha_n > 0 \quad (\text{I-21})$$

• Modèle Neo Hookéen

Le modèle Neo Hookéen est le modèle hyper élastique le plus simple. Il correspond au modèle de Mooney Rivlin à un seul terme, mais sa justification est plus moléculaire que phénoménologique. En utilisant les lois de la mécanique statistique on peut écrire W sous la forme:

$$W = C_{10} \left(\bar{I}_1 - 3 \right) + D_1 (J-1)^2 \quad (\text{I-22})$$

• Modèle de Blatz-Ko

La densité d'énergie de déformation de Blatz-ko est couramment utilisé pour la modélisation de matériaux caoutchoucs et peut s'exprimer ainsi :

$$W = \frac{G}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right) \quad (\text{I-23})$$

- **Modèle de Hart-Smith**

Hart-Smith (1966) a construit une fonction d'énergie de déformation afin d'adapter les données de Treloar (Equation I-24).

$$W = \mu_1 \int \exp \left\{ \nu_1 (I_1 - 3)^2 \right\} dI_1 + \mu_2 \ln(I_2 / 3) \quad (\text{I-24})$$

avec $(r = 1,2)$ et ν_s ($s = 1$) constants. Cette fonction offre une bonne corrélation avec les données expérimentales pour les petites et moyennes déformations.

- **Modèle d'Alexander**

Alexander (1968) sur la base de ses propres expériences pour le néoprène, propose le modèle suivant :

$$W = \mu_1 \int \exp \left\{ \nu_1 (I_1 - 3)^2 \right\} dI_1 + \mu_2 \ln \left(\frac{I_2 - 3 + \nu_2}{\nu_2} \right) + \mu_3 (I_2 - 3) \quad (\text{I-25})$$

avec μ_r ($r = 1,2,3$) et ν_s ($d = 1,2$) constants.

Les modèles ci-dessus sont des modèles couramment utilisés pour la modélisation du comportement hyperélastique de matériaux tels que les élastomères, les caoutchoucs, les néoprènes. Du fait des similarités de comportement entre les élastomères et les mousses de polyuréthane, il peut être intéressant d'utiliser certains de ces modèles pour modéliser nos mousses.

1.3.2.2 Les modèles viscoélastiques

Un aspect essentiel du comportement de la mousse de polyuréthane est sa propriété de viscoélasticité. La viscoélasticité d'un matériau se caractérise par une rigidité hyperélastique du corps et dans le même temps une capacité à dissiper de l'énergie par du frottement interne, et à se comporter comme un fluide visqueux. Les théories de l'élasticité linéaire et du fluide newtonien ne permettent pas de décrire correctement le comportement de la plupart des matériaux. Le comportement intermédiaire ou mixte, appelé viscoélasticité, caractérise de nombreux matériaux dont les mousses de polyuréthane.

Le comportement est alors caractérisé par une dépendance de la contrainte à la fois à la déformation, à la vitesse de déformation, ainsi qu'à des dérivées d'ordre plus élevé par rapport au temps de la déformation [FER80].

On peut donc construire à partir des éléments rhéologiques de base : les ressorts (éléments conservatifs de l'énergie) et les amortisseurs (éléments visqueux dissipatifs d'énergie), des modèles de comportement.

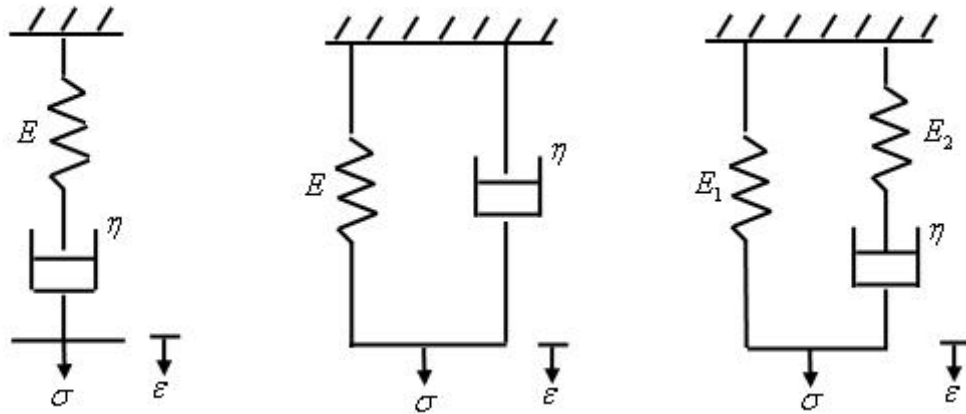
Des modèles simples peuvent représenter le comportement viscoélastique, tel que le modèle de Maxwell (équation 1-26), le modèle de Kelvin-Voigt (équation 1-27) et le modèle de Zener (équation 1-28). Ces modèles constituent les modèles élémentaires de la viscoélasticité linéaire (figure I-21):

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{E} \dot{\sigma}(t) + \frac{1}{\eta} \sigma(t) \quad (\text{I-26})$$

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta\dot{\varepsilon}(t) \quad (\text{I-27})$$

$$\frac{E_1 + E_2}{E_1}\dot{\varepsilon}(t) + \frac{E_2}{\eta}\varepsilon = \frac{1}{E_1}\dot{\sigma}(t) + \frac{1}{\eta}\sigma(t) \quad (\text{I-28})$$

où σ désigne ici la contrainte viscoélastique, ε la déformation, (E, E_1, E_2) les raideurs des éléments hyperélastiques (représentés schématiquement par des ressorts) et η le coefficient d'amortissement visqueux des éléments dissipatifs (représentés schématiquement par des amortisseurs).



(a) Modèle de Maxwell (b) Modèle de Kelvin Voigt (c) Modèle de Zener

Figure I-21 Les modèles élémentaires de la viscoélasticité [JMA12]

Il existe d'autres modèles élémentaires de la viscoélasticité linéaire tels que le modèle de Dupaix-Boyce et le modèle de Kelvin dans la littérature et ils sont aussi couramment utilisés pour la modélisation du comportement viscoélastique de matériaux.

1.3.2.3 Les modèles à mémoire

Les modèles à mémoire décrivent la viscoélasticité par une fonction de convolution et le non linéarité du comportement hyperélastique par une fonction polynomiale. Le produit de convolution peut être dérivé d'une équation différentielle ordinaire, ainsi le modèle est dit un modèle à mémoire entier, ou dérivé d'une équation différentielle contenant une dérivation fractionnelle, dans ce cas le modèle est un modèle à mémoire fractionnaire.

Les modèles à mémoire illustrent donc l'effet de l'historique de la mousse de polyuréthane sur son comportement. Les modèles à mémoire entier, ont fait l'objet de multiples recherches [JMA12, WHI98, SIN01, IPP08]. De plus, Jmal [JMA12] et Deng [DEN03, DEN04] ont également présenté les modèles à mémoire fractionnaires dans leurs études.

• Modèles à mémoire entier

D'une façon générale, pour un modèle à mémoire entier, la relation entre la contrainte et la déformation est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$p_0 \sigma(t) + p_1 \frac{d\sigma(t)}{dt} + \dots + p_m \frac{d^m \sigma(t)}{dt^m} = q_0 \varepsilon(t) + q_1 \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \dots + q_n \frac{d^n \varepsilon(t)}{dt^n} \quad (I-29)$$

avec (n, m) deux entiers quelconques et $((q_i)_{i=1..n}, (p_i)_{i=0..m})$ des coefficients caractéristiques du matériau.

La solution de l'équation I-29 peut être donnée par l'équation I-30 si $m > n$, $m > 2$ ou par l'équation I-31 si $m = n$, $m > 2$ et $q_0 = 0$.

$$\sigma_{ve}(t) = \int_0^t \sum_{l=1}^P a_l e^{-\alpha_l(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (I-30)$$

$$\sigma_{ve}(t) = K_{ve} \varepsilon(t) + \int_0^t \sum_{l=1}^P a_l e^{-\alpha_l(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (I-31)$$

Ces expressions ont été utilisées par Jmal [JMA12] afin de modéliser le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane soumise à des grandes déformations.

• modèle à mémoire fractionnaire

Pour décrire la viscoélasticité, un nouvel élément rhéologique modélisé par l'équation I-32 a été ajouté [BAG84].

$$F(t) = \eta x^{(\beta)}(t) = \eta D^\beta(x(t)) \quad (I-32)$$

où η désigne ici la raideur du ressort fractionnaire et β un fractionnaire entre 0 et 1. S'il tend vers zéro, l'élément viscoélastique revient à un comportement quasi-linéaire. En revanche, s'il tend vers un, l'élément est à dominance visqueuse. Ce composant est dit ressort fractionnaire (figure I-22).

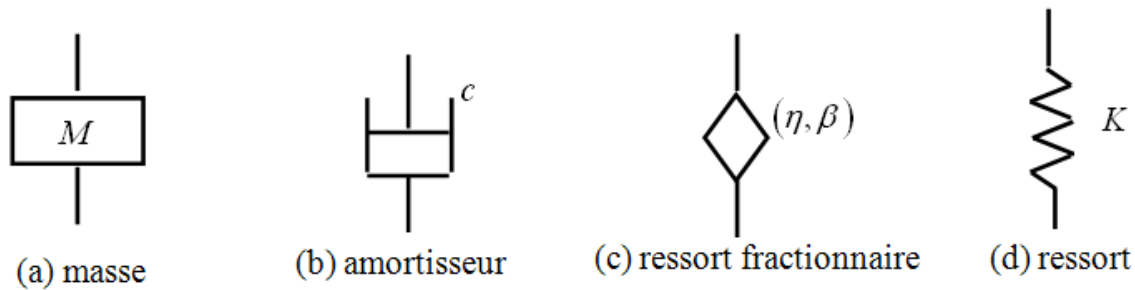


Figure I-22 Eléments d'une modélisation mécanique [JMA12]

Une combinaison en série et en parallèle des modèles élémentaires fractionnaires permet de construire un modèle fractionnaire linéaire plus général donné par l'expression suivante :

$$p_0 \sigma^{\beta_0}(t) + p_1 \frac{d\sigma^{\beta_1}(t)}{dt^{\beta_1}} + \dots + p_m \frac{d\sigma^{\beta_m}(t)}{dt^{\beta_m}} = q_0 \varepsilon^{\gamma_0}(t) + q_1 \frac{d\varepsilon^{\gamma_1}(t)}{dt^{\gamma_1}} + \dots + q_n \frac{d\varepsilon^{\gamma_n}(t)}{dt^{\gamma_n}} \quad (I-33)$$

avec $((\beta_i)_{i=0..m}, (\gamma_i)_{i=0..n})$ des fractionnaires quelconques.

Deng [DEN04] et Jmal [JMA12] ont utilisé l'expression de la force viscoélastique donnée par l'équation I-33 afin de prévoir le comportement viscoélastique de la mousse lors des essais de compression/décompression quasi-statique. Les paramètres des modèles à mémoire développés par Deng [DEN04], dépendent des conditions de test ce qui affecte leur représentativité. Jmal [JMA12] a considéré des transformations des paramètres dimensionnels en paramètres adimensionnels. Ses résultats d'identification en quasi-statique ont montré qu'ils sont quasi-invariants en fonction des conditions d'essai.

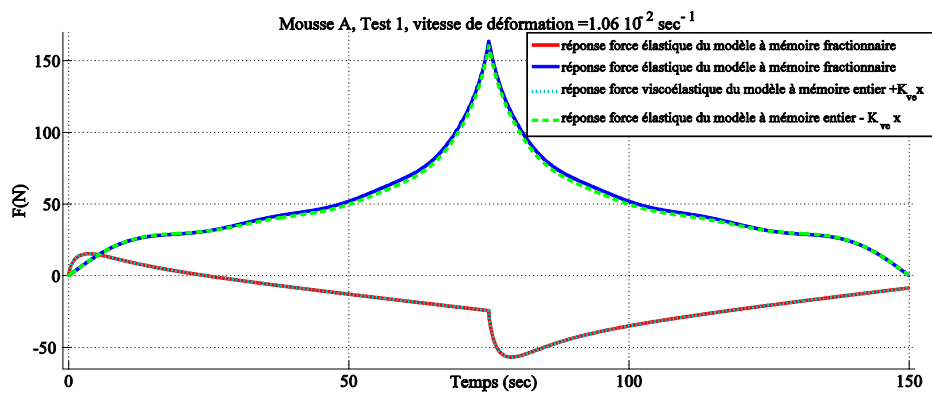


Figure I-23 Les résultats deux modèles à mémoire : entier et fractionnaire [JMA12]

Il a montré que la réponse de la 'force viscoélastique' donnée par les deux modèles à mémoire entier et fractionnaire est généralement de signe négatif (Figure I-23). Elle modélise l'effet de relaxation et explique la présence d'une contrainte résiduelle non permanente à la fin des essais. Jmal [JMA12] a utilisé des paramètres viscoélastiques pendant la charge et la décharge identiques, cependant nous pensons qu'il faut plutôt considérer des paramètres différents en charge et décharge.

De nombreuses études expérimentales en dynamique et en quasi-statique ont été réalisées pour l'identification des paramètres des modèles à mémoire dans la littérature. Par exemple, [SIN01] a proposé une méthode d'identification dans le domaine temporel basé sur l'estimation de la solution analytique de son modèle à mémoire entier et linéaire dans un premier temps. Cette solution analytique est établie pour la caractérisation du comportement de la mousse de polyuréthane suite à un essai d'impact à faible amplitude. D'autres méthodes dans la littérature ont été considérées pour étudier le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane [DEN04, IPP08].

1.4 Identification et optimisation

1.4.1 Méthodes d'identification des modèles

La mousse de polyuréthane sous grande déformation présente à la fois un comportement viscoélastique et un comportement hyperélastique non linéaire pendant un essai de compression/décompression quasi-statique. Il s'agit donc de déterminer d'une part les paramètres décrivant le comportement hyperélastique, et d'autre part les paramètres décrivant le comportement viscoélastique.

Nous présenterons ici deux méthodes d'identification des paramètres inconnus des modèles développés dans la littérature par rapport les structures mathématiques des modèles à mémoire développés à savoir deux méthodes : méthode de la contrainte moyenne et méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge [JMA12].

1.4.1.1 La méthode de la contrainte moyenne

La méthode de la contrainte moyenne est une méthode itérative en trois étapes (figure I-24).

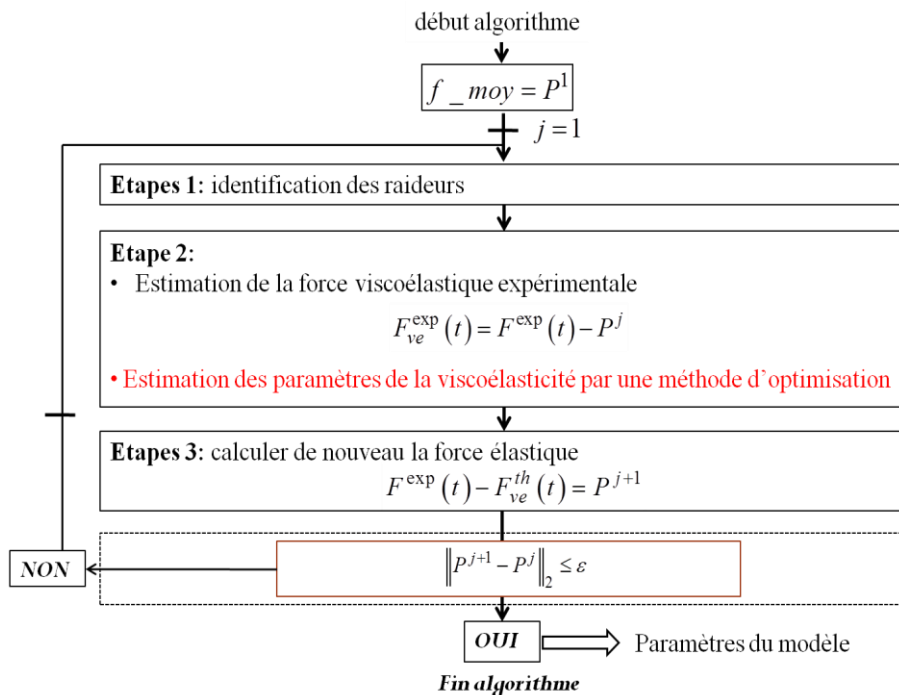


Figure I-24 La méthode de la contrainte moyenne [JMA12]

Dans la première étape, un polynôme hyperélastique initial est ajusté en fur et à mesure afin d'obtenir la meilleure correspondance entre la courbe force-déplacement expérimentale et celle obtenue par le modèle à mémoire entier. Les commandes 'Polyfit' et 'Polyval' du logiciel de matriciel «MATLAB » sont utilisées pour identifier le vecteur de raideurs.

Dans la deuxième étape, les paramètres viscoélastiques de la mousse sont identifiés par une méthode d'estimation telle que la méthode de régression linéaire ARMA [IPP08].

Dans la troisième étape, on peut déterminer un nouveau polynôme hyperélastique grâce à l'évaluation de la force viscoélastique.

1.4.1.2 La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge

La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge est basée sur la symétrie de la contrainte hyperélastique entre les phases de charge et de décharge. Ainsi, seuls les paramètres viscoélastiques seront présents dans l'expression analytique de la différence entre la force de charge et celle de décharge. On peut décomposer cette méthode en trois étapes (figure I-25).

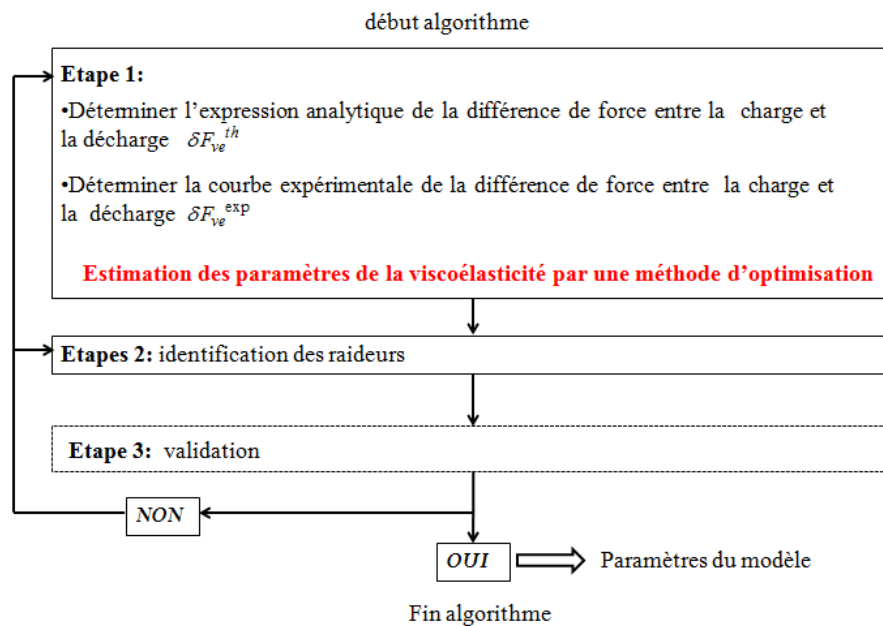


Figure I-25 La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge [JMA12]

Dans la première étape, l'expression analytique de la différence de contrainte entre la charge et la décharge est déterminée.

Dans la deuxième étape, la reconstruction de la réponse viscoélastique dans les phases de charge et de décharge permet la détermination de la réponse hyperélastique et de vérifier la condition de symétrie.

Dans la troisième étape, les coefficients des polynômes sont identifiés en utilisant les fonctions 'polyfit' et 'polyval' du logiciel «MATLAB ».

Cette méthode est basée sur une hypothèse logique et physique. Par contre, il est possible d'arriver sur un optimum local si la fonction à optimiser n'est pas convexe. Par conséquent, les paramètres viscoélastiques qui sont obtenus par cette approche dépendent de l'initialisation de la méthode d'optimisation et de la méthode elle-même.

1.4.2 Méthodes d'optimisation des modèles

Dans cette section, nous allons parler des principales méthodes d'optimisation. Il est nécessaire de choisir une méthode d'optimisation pour l'estimation des paramètres visco élastiques dans les modèles. Dans la littérature, il existe deux méthodes principales qui peuvent être classées en méthodes déterministes et méthodes stochastiques.

1.4.2.1 Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont couramment utilisées pour faire l'optimisation d'une fonction Objectif. Certaines méthodes nécessitent uniquement la connaissance de la fonction Objectif, elles sont dites d'ordre zéro. Certaines d'autres nécessitent la connaissance à la fois de la fonction Objectif et de ses dérivées. Si la méthode utilise en plus de la fonction Objectif sa dérivée première, elle est dite d'ordre 1. Cependant, si elle nécessite en plus la dérivée seconde, on la classifie dans la catégorie des méthodes déterministes d'ordre 2.

Pour l'ordre 1, il existe la méthode de Cauchy [CUL94], la méthode de gradient conjugué et la méthode de région de confiance. Cependant, l'ordre 2 est composé par la méthode quasi-Newton et la méthode de Powell [PRE92]. Ces deux méthodes sont basées sur la détermination d'une direction de recherche d'optimisation descendante (figure I-26) qui permet d'accélérer la localisation de l'optimum.

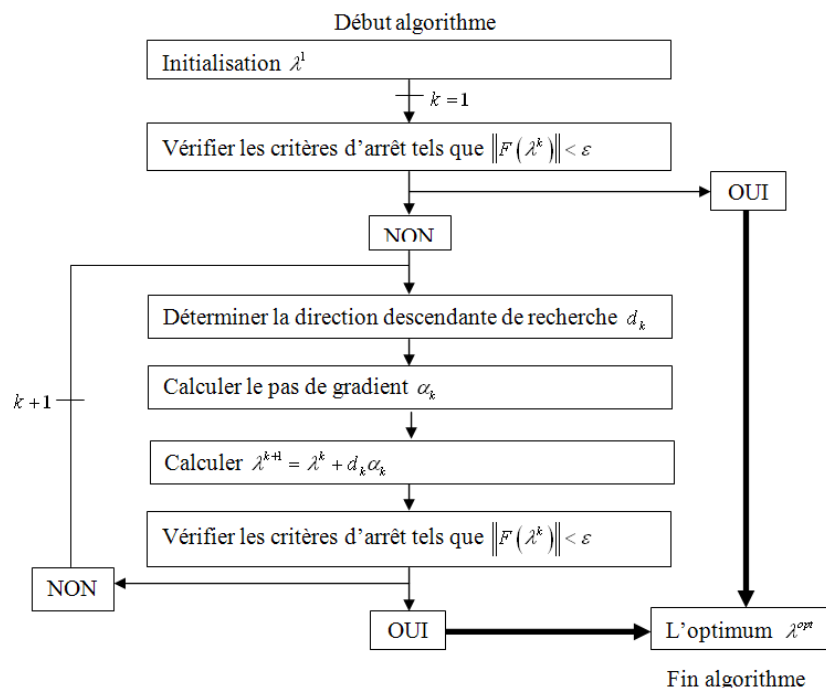


Figure I-26 Algorithme des méthodes d'optimisation déterministes basées sur la recherche d'une direction descendante [JMA12]

Les avantages des méthodes déterministes sont qu'elles convergent rapidement et précisément vers l'optimum si celui-ci est proche du point d'initialisation grâce à la recherche d'une direction descendante. Par contre, elles montrent aussi plusieurs inconvénients. Elles ne sont applicables que pour les fonctions objectives continument différentiables et elles nécessitent la résolution de systèmes matriciels pouvant être mal conditionnés [MIN83].

1.4.2.2 Méthodes stochastiques (non déterministes)

Les méthodes d'optimisation déterministes s'arrêtent sur le premier optimum rencontré même s'il existe un cas d'optima multiples. Les méthodes stochastiques sont une approche alternative pour palier à cet inconvénient. Elles permettent de trouver le minimum global d'une fonction objectif même dans les cas difficiles. Les méthodes stochastiques les plus utilisées dans la littérature sont données par la figure I-27.

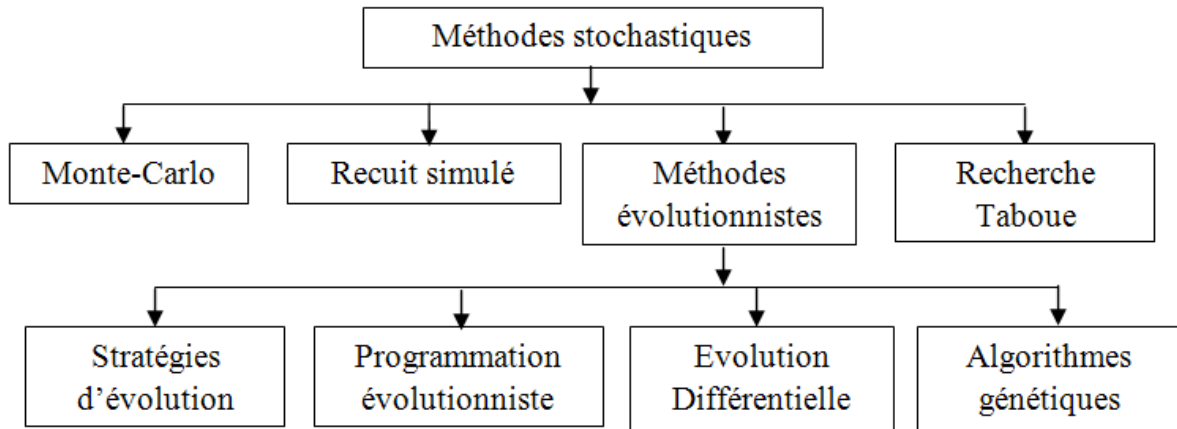


Figure I-27 Méthodes stochastiques (non déterministes) [HAJ03]

Les méthodes d'optimisation stochastiques ont la possibilité de déterminer l'optimum global même pour des fonctions objectif complexes. Par contre, les méthodes stochastiques demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif pour obtenir les bons résultats. Ceci se traduit par un temps de calcul très élevé comparé aux méthodes déterministes surtout lorsque le calcul de la performance de chaque nouvelle solution proposée par le processus d'optimisation nécessite la résolution d'un modèle éléments finis [BOU10].

1.5 Conclusion du chapitre I

Ce premier chapitre a permis d'établir une synthèse bibliographique sur la mousse de polyuréthane, sa caractérisation et l'étude de son comportement.

Tout d'abord, les bases de chimie des polyuréthanes ont été présentées et nous avons pu voir que les caractérisations mécaniques des mousses polyuréthanes sont fortement liées aux paramètres du matériau, à savoir, la structure cellulaire, la densité la porosité et la méthode de formulation et fabrication. Les méthodes d'essais classiques et les différentes études ont été présentées dans ce chapitre, à savoir les tests statiques, les tests quasi-statiques et les tests dynamiques. Il a été montré que la mousse de polyuréthane présente à la fois un comportement hyperélastique non-linéaire et un comportement viscoélastique sous grande déformation. Les études d'effet de Mullins pour la mousse de polyuréthane, une partie importante dans notre travail, sont aussi présentées.

De plus, en ce qui concerne la modélisation du comportement mécanique de la mousse de polyuréthane, il a été montré que les modèles micromécaniques et les modèles macromécaniques sont les deux principales approches pour modéliser le comportement mécanique. Les modèles micromécaniques se concentrent sur la structure microscopique et permettent de relier les propriétés géométriques des cellules et les propriétés hyperélastiques de la mousse. Ils peuvent décrire le comportement hyperélastique non linéaire pour la mousse de polyuréthane sous grande déformation. Les modèles macromécaniques tels que les modèles hyperélastiques, les modèles viscoélastiques et les modèles à mémoire permettent de déterminer le comportement hyperélastique et le comportement viscoélastique de la mousse de polyuréthane d'une façon plus macroscopique.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'identification et l'optimisation des modèles. La synthèse bibliographique présentée dans ce chapitre nous a permis d'indiquer deux méthodes d'identification : la méthode de la contrainte moyenne et la méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge. Ces deux méthodes ont été utilisées pour déterminer les paramètres des modèles à mémoire en quasi-statique.

La spécificité de notre étude réside dans la complexité du domaine d'application de la mousse de polyuréthane sur le siège de voiture, à savoir l'étude du comportement quasi-statique de la mousse sous grande déformation. Dans notre travail, nous allons tout d'abord présenter les expérimentations de compression/décompression (chapitre II). Les étapes des essais, les dispositifs de microscopie et d'essais compression/décompression seront détaillés. Les résultats du premier cycle et les résultats des 4 cycles pendant les essais compression/décompression sont également donnés dans ce chapitre. Ensuite, les modèles à mémoire entier et les modèles hyperélastiques seront présentés dans le chapitre III. Les modélisations du comportement quasi-statique de la mousse et les méthodes d'identification seront détaillées. Les résultats des modèles analytiques pour le premier cycle seront également donnés dans cette partie. La modélisation de l'effet de Mullins sera présentée dans le dernier chapitre (chapitre IV). Les résultats pour trois types de mousses sur trois tests pendant 4 cycles seront également détaillés dans ce chapitre. Une conclusion présentant un bilan de ce travail ainsi que des perspectives viendront terminer ce manuscrit.

Chapitre II: Etude expérimentale

2.1 Introduction

Afin de pouvoir mettre en place une modélisation fiable des mousses de polyuréthane que nous étudions, il est nécessaire de nous appuyer sur des données expérimentales valables. Nous allons donc présenter dans ce chapitre, l'étude expérimentale que nous avons réalisée. Nous présenterons d'abord le protocole de détermination des propriétés physico-chimiques des mousses que nous avons mis en place. Les types des mousses, les géométries des échantillons et les masses volumiques des mousses sont détaillées dans cette partie. La méthode de mesure de la porosité de la mousse avec les dispositifs d'essai de microscopique sont également présentés.

Nous présenterons ensuite le protocole d'essais de compression/décompression unidirectionnel monocycle et multi cycles sur trois mousses différentes avec trois vitesses. Le dispositif d'essai de compression/décompression et les conditions des essais sont également donnés.

Nous présenterons enfin les résultats de compression/décompression du monocycle et des multi cycles. Les résultats expérimentaux de comparaisons de trois mousses et de comparaisons de trois vitesses sont également détaillés.

2.2 Caractérisation physico-chimique des mousses

2.2.1 Type de mousse

Nous avons choisi de travailler sur trois différents types de mousses de polyuréthane qui sont désignés par 'mousse A', 'mousse B' et mousse C'. Ces trois types de mousses sont des mousses industrielles similaires à celles utilisées dans les sièges de différents véhicules automobiles. Ces mousses sont des mousses souples à cellules ouvertes produites en moulage ouvert, ce qui permet d'obtenir des matelas de mousses de grand volume. Les matières premières de ces trois mousses de polyuréthane sont composées par les mêmes types d'isocyanate (toluène diisocyanate TDI), les mêmes polyols (polyéther) et les mêmes agents d'expansion CO_2 .

2.2.2 Géométrie des échantillons

Deux géométries d'échantillons de matériaux cellulaires sont principalement utilisées dans la littérature pour les différents essais: la géométrie parallépipédique et la géométrie cylindrique [SAI06]. La géométrie cylindrique est couramment utilisée pour limiter les effets de bords qui sont plus importants sur les échantillons de petites dimensions. Dans notre étude, les échantillons de mousses polyuréthane sont cubiques afin de faciliter la découpe et de pouvoir comparer nos résultats aux travaux de Singh, White et Deng [SIN00, WHI98, DEN03].

Pour les matériaux massifs, il est assez facile de distinguer des échelles microscopiques et macroscopiques. Les échelles microscopiques sont bien inférieures aux échelles macroscopiques et les différences entre ces deux structures sont bien claires. En revanche, les échelles de la structure cellulaire sont proches des échelles macroscopiques dans les matériaux cellulaires tels que les mousses de polyuréthane, polymères etc. Pour cette raison, il

est nécessaire de trouver une taille ou un volume représentatif pour ces matériaux afin d'étudier le comportement global. Dans le travail de Rakow et al. [RAK05], des essais de cisaillement ont été réalisés pour montrer les effets d'échelles afin de déterminer un volume d'échantillon représentatif du comportement massif sur la mousse aluminium. Ils ont testé différentes densités correspondant à différentes tailles de cellules. Dans la surface du matériau, ils ont prélevé des régions de taille de plus en plus petites pour trouver le volume représentatif de ce matériau (figure II-1).

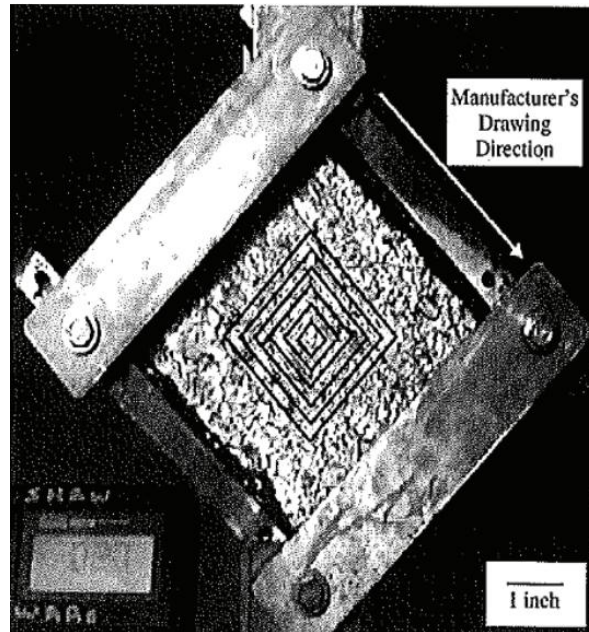


Figure II-1 Essai de cisaillement pour évaluer les effets d'échelles [RAK05]

Dans la figure II-1, chaque région carrée a un nombre de cellules par arête. Le nombre de la première région (le plus petit carré) est 9 et la dernière région (le plus grand carré) comprend 24 cellules. Pour négliger les effets de bords pendant les essais, il est nécessaire d'assurer que la première région a une arête deux fois plus petite que l'arête de l'échantillon totale. Les courbes moyennées de la déformation en fonction de la contrainte pour chaque région sont données par la figure II-2.

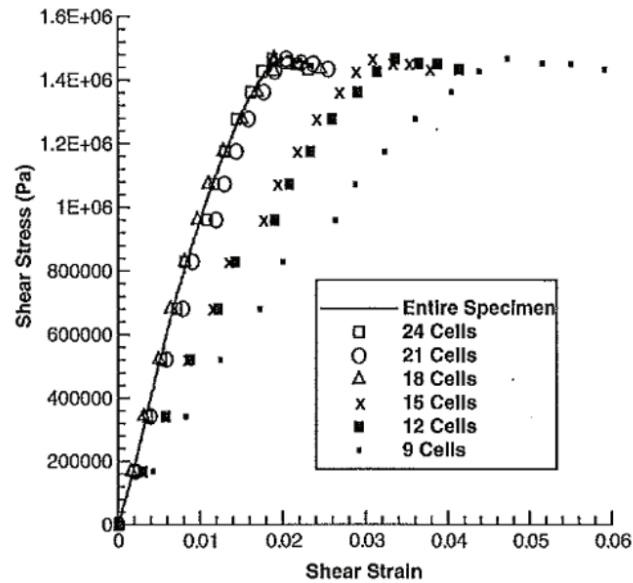


Figure II-2 Courbes des déformations en fonction des contraintes pour chaque région [RAK05]

Sur la figure II-2, il est très clair qu'à partir de 18 cellules, les échantillons ont le même comportement que l'échantillon complet. C'est-à-dire que les volumes qui comprennent 18 cellules ou plus sont les volumes représentatifs pour le matériau.

Nous avons choisi des échantillons de $75\text{mm} \times 75\text{mm} \times 75\text{mm}$, ce qui nous assure d'avoir un très grand nombre de cellules dans notre échantillon, et donc d'être au delà du volume représentatif.

Les échantillons de mousses de polyuréthane ont été découpés par un bloc de mousse fabriqué en moulage ouvert, de dimensions $2000\text{mm} \times 1200\text{mm} \times 95\text{mm}$ (longueur, largeur, hauteur). Pour obtenir les échantillons précisés, trois méthodes de découpe sont couramment utilisées dans la littérature : la découpe à la scie, la découpe au cutter et la découpe au jet d'eau [DEN12]. Suite à la comparaison des trois méthodes de travail [DEN12], nous avons utilisé la scie à ruban pour les découpes d'éprouvettes. Comme le montre la figure II-3, les échantillons sont découpés après avoir enlevé 10mm de mousse sur tout le pourtour du bloc, afin d'éliminer les effets de bords.

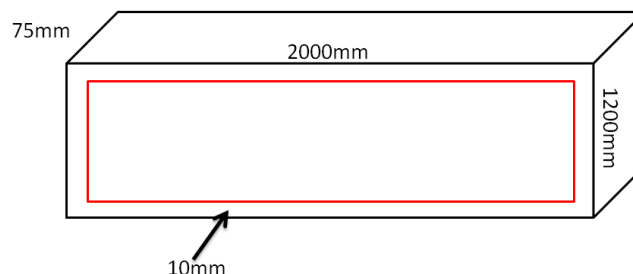


Figure II-3 Schéma de découpe des échantillons

Ensuite, nous avons effectué le tracé et la découpe aux dimensions imposées par le cahier des charges. Après la découpe des mousses, nous avons laissé reposer celles-ci 24h pour ne pas avoir de résultats biaisés du fait de l'appui du ruban de découpage sur les mousses. Après la

découpe, nous avons observé qu'il pouvait exister une différence de hauteur non négligeable entre certains cubes de mousse. Pour cette raison, nous n'avons pas retenu les blocs avec des épaisseurs supérieures ou inférieures de 2 mm par rapport à la cote nominale choisie.

2.2.3 Masse volumique

La masse volumique d'un échantillon est définie par le rapport entre la masse et le volume. Dans notre travail, les masses volumiques des trois types de mousse de polyuréthane sont données par le fournisseur respectivement de 28 kg/m^3 pour mousse A, de 40 kg/m^3 pour mousse B et de 50 kg/m^3 pour mousse C. Pour vérifier les masses volumiques de ces trois mousses et déterminer l'écart type, nous avons remesuré les masses volumiques des trois mousses. Il existe deux méthodes pour la mesure de la masse volumique de la mousse : par la mesure dite géométrique pour les échantillons les plus volumineux et par la mesure basée sur le principe d'Archimède [DEN12]. Comme il peut s'avérer difficile de remplir l'ensemble des alvéoles de la mousse d'un liquide pour réaliser la pesée dans le liquide, nous avons utilisé la méthode de 'mesure géométrique'. Dans ce cas, les masses des échantillons sont pesées par une balance électrique de précision avec une sensibilité de 10^{-1} g et les volumes des échantillons sont mesurés au pied à coulisse (figure II-4).

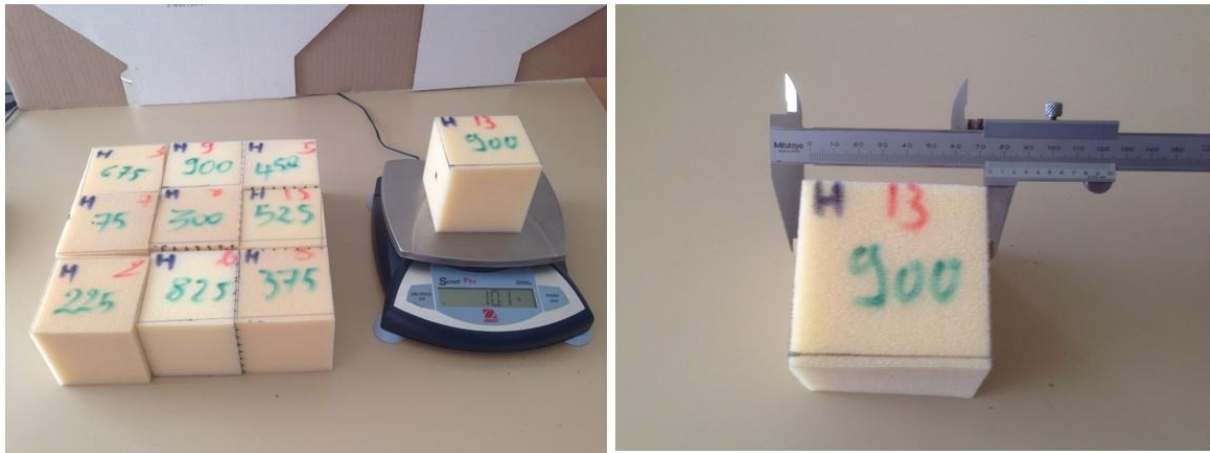


Figure II-4 Dispositif expérimental pour la mesure de la masse volumique de la mousse

La masse volumique est mesurée par les masses volumiques moyennes des nombres d'échantillons et donnée par l'équation suivante :

$$D_{\text{moy}} = \frac{M_{\text{ech}_1} / V_{\text{ech}_1} + M_{\text{ech}_2} / V_{\text{ech}_2} + \dots + M_{\text{ech}_N} / V_{\text{ech}_N}}{N} \quad (\text{II-1})$$

avec :

- D: masse volumique de la mousse
- M: masse de l'échantillon
- V: volume de l'échantillon
- N: nombre de l'échantillon

Les valeurs moyennes des masses volumiques et les écarts types de trois mousses sont donnés par le tableau II-1.

Tableau II-1 Masses volumiques des mousses A, B and C

Mousse	Nombre de l'échantillon	Valeur moyenne (kg/m^3)	Ecart type (kg/m^3)
mousse A	10	25.59	0.669
mousse B	10	38.89	0.638
mousse C	10	47.42	0.835

2.2.4 Méthode de mesure de la porosité

Les mousses de polyuréthane sont caractérisées par leur porosité qui est définie comme le volume de gaz rapporté au volume total. Dans notre travail, la porosité de trois types mousse est déterminée grâce à un dispositif de test (figure II-5) utilisant le logiciel 'Matrox-intellicam'. Nous avons pris des photos de chaque échantillon mousse après avoir calibré l'image. La méthode de 'Visiocell' est utilisée ici pour le calcul de porosité des mousses. Tout d'abord, on découpe un échantillon de mousse perpendiculairement à la direction d'expansion, puis, on photographie la surface et choisit sur l'image une cellule représentative dont on mesure le diamètre le plus grand. La cellule qu'on a choisi doit être circulaire et avoir un ou deux pentagones en son centre. Par la suite, nous mesurons le diamètre de la cellule.

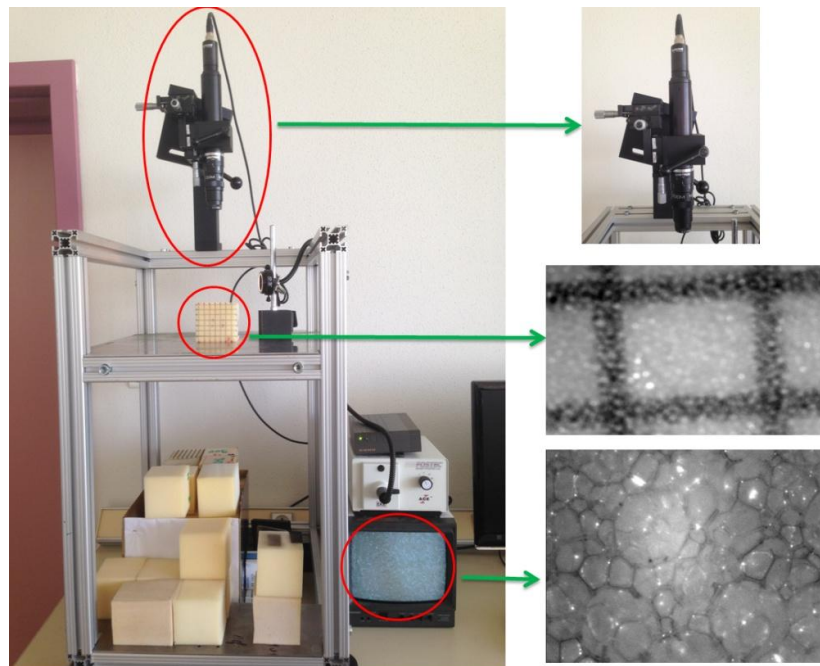


Figure II-5 Dispositifs d'essai de microscopique

Après avoir mesuré une dizaine de cellule pour chaque échantillon mousse, nous avons converti nos mesures dans l'échelle réelle à l'aide d'une photo d'un quadrillage connu qui a servi d'étalonnage. Pour les trois mousses A B et C, nous avons calculé la moyenne des diamètres obtenus afin d'obtenir le diamètre moyen des cellules. Les images des cellules des trois mousses sont données par la figure II-6.

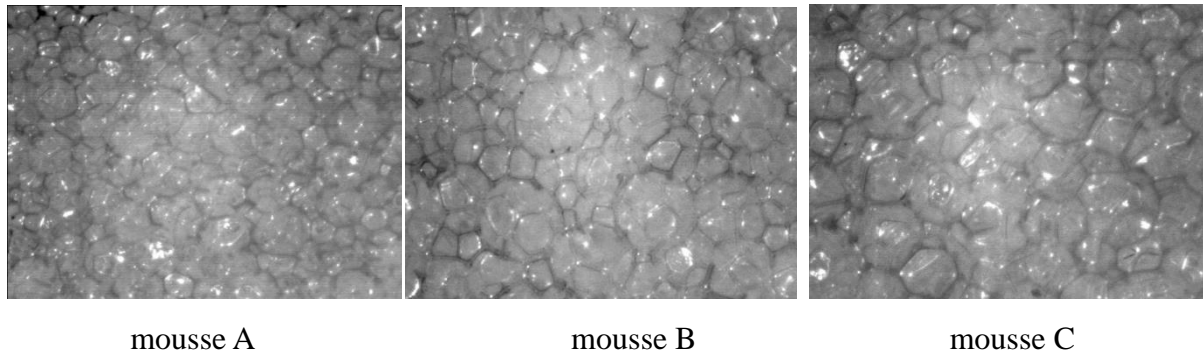


Figure II-6 Les images des cellules de trois mousses

Les valeurs moyennes des porosités et les écarts types de trois mousses sont donnés par le tableau II-2.

Tableau II-2 Porosités des mousses A, B and C

Mousse	Nombre d'échantillons	Valeur moyenne de la porosité (μm)	Ecart type (μm)
mousse A	18	828	69
mousse B	15	530	29
mousse C	16	457	50

2.2.5 Tableau récapitulatif

Les désignations et les caractéristiques chimiques et morphologiques des mousses sont résumées dans le tableau II-3.

Tableau II-3 Caractéristiques chimiques et morphologiques des trois mousses

Désignation	mousse A	mousse B	mousse C
Type de la mousse	polyuréthane souple	polyuréthane souple	polyuréthane souple
Isocyanate	Toluène diisocyanate TDI	Toluène diisocyanate TDI	Toluène diisocyanate TDI
Polyol	Polyéther	Polyéther	Polyéther
Agent d'expansion	CO ₂	CO ₂	CO ₂
Processus de fabrication	Moulage ouvert	Moulage ouvert	Moulage ouvert
Masse volumique	28 kg/m ³	40 kg/m ³	50 kg/m ³
Densité de population	2.94/mm ²	3.01/mm ²	3.27/mm ²
Taille de cellule moyenne	828 μm	530 μm	457 μm
Forme d'échantillon	cubique	cubique	cubique
Dimensions $l_0 = L_0 = h_0$	75mm	75 mm	75mm
Type de cellules	ouvert	ouvert	ouvert

2.3 Protocole expérimental de compression/décompression

Notre étude expérimentale a consisté à réaliser des essais de compression/décompression unidirectionnels monocycle et multi-cycles. Les cycles de sollicitation sont composés d'une phase de charge et d'une phase de décharge à la même vitesse de déformation. La décompression commence lorsqu'on atteint le niveau de compression final préalablement déterminé.

2.3.1 Machine d'essai

Tous les essais de compression/décompression à faible vitesse de déformation ont été réalisés avec un dispositif standard de traction-compression «Instron 33R4240» (Figure II-7) qui fonctionne avec le logiciel BLUEHILL. Le dispositif comporte un bâti et une traverse supérieure qui se déplace verticalement. Deux plateaux de compression ont été installés sur cet appareil: un sur la base de la machine et l'autre sur le capteur de force de la traverse mobile. Les deux plateaux ont été vérifiés pour être strictement parallèles. Avant le début de l'essai, le plateau supérieur se déplace pour avoir un contact avec l'échantillon sur toute sa surface, car la partie supérieure et la partie inférieure de chaque échantillon de mousse ne sont pas exactement parallèles.

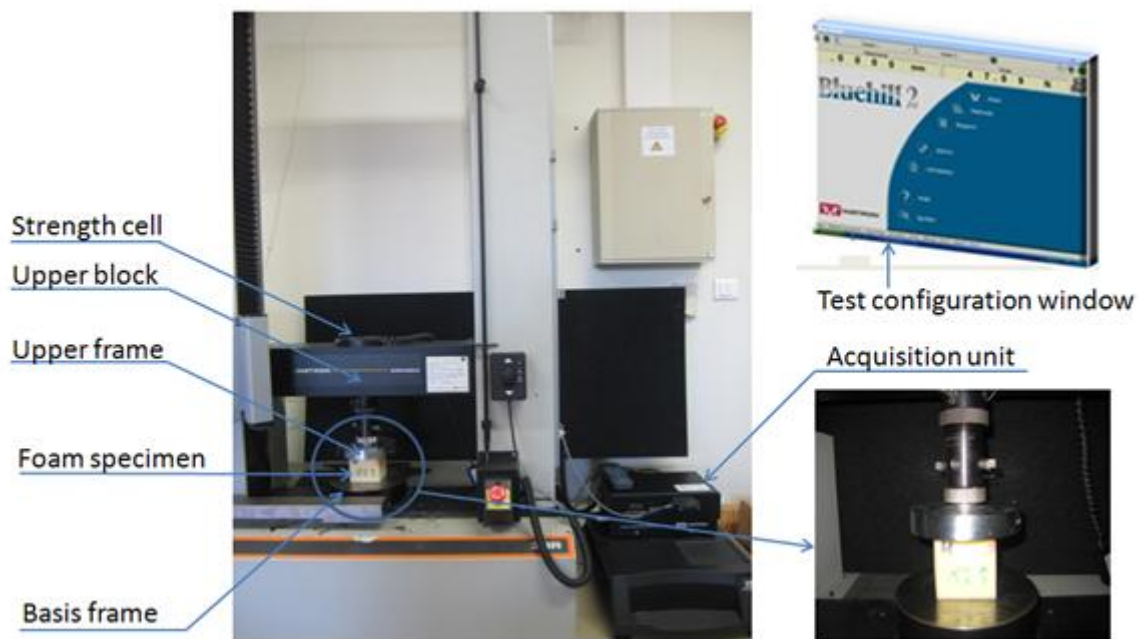


Figure II-7 Dispositif d'essai de compression/décompression unidirectionnel

Afin de pouvoir considérer un champ de déformations homogène, les contraintes de cisaillement entre les plateaux supérieur et inférieur et l'échantillon durant l'essai de compression unidirectionnel ont été éliminées [SCH05].

Afin de maximiser le rapport signal/bruit et minimiser la contribution du bruit, la force de réaction expérimentale maximale de la mousse doit être légèrement inférieure à la capacité maximale de la cellule de charge. Les conditions des tests telles que la vitesse de déformation, le taux de compression maximale, le nombre de cycles, la période d'échantillonnage et les tests des paramètres mécaniques exportés ont été contrôlées à l'aide de la fenêtre de configuration du logiciel Bluehill (Figure II-7).

2.3.2 Essais de compression/décompression monocycle

Pour l'essai de compression/décompression monocycle, l'échantillon a été mis en position sur le plateau inférieur. L'essai débute lorsque le plateau supérieur est en contact sur toute la surface du bloc de mousse. Le plateau supérieur se déplace vers le bas pour atteindre le niveau de compression final, soit 80% de l'épaisseur initiale. A la fin de la phase de charge, le plateau

supérieur remonte jusqu'à la position initiale. Les vitesses de compression et de décompression sont constantes et identiques au cours de l'essai.

Un essai de compression/décompression est dit quasi-statique ou dynamique en fonction de la vitesse de déformation. Dans son étude, Deng [DEN04] a montré que pour une vitesse de déformation inférieure à 10^{-2} s^{-1} , les essais sont quasi-statiques pour le type de mousse de polyuréthane qu'il a étudié. Dans le travail de Jmal [JMA12], des tests de compression/décompression multi-cycles sur les trois différents types de mousse ont été réalisés pour déterminer la vitesse limite entre quasi-statique et dynamique. La figure II-8 présente l'évolution de la contrainte maximale pendant le 4^{ème} cycle en fonction de la vitesse de déformation pour la mousse A. Il est nettement montré dans la figure que la vitesse limite entre les tests quasi-statiques et dynamiques est de l'ordre de 0.02 sec^{-1} pour la mousse A.

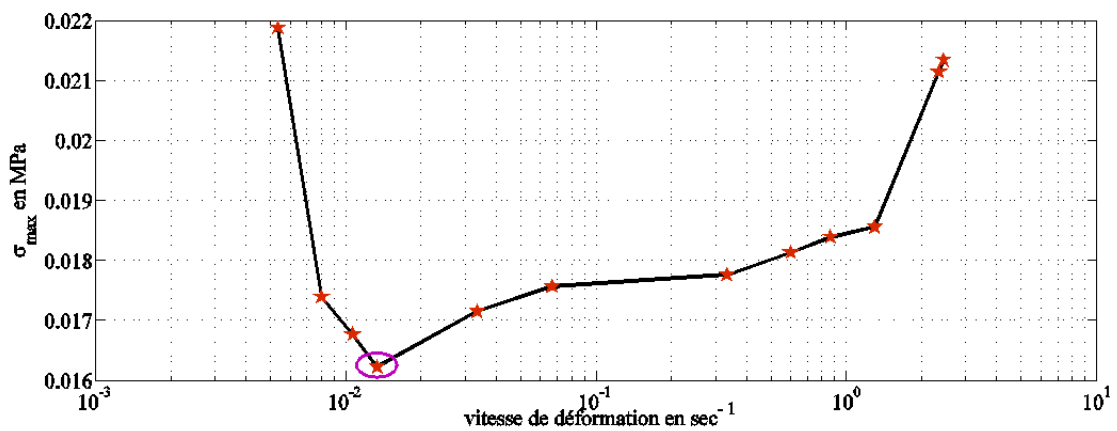


Figure II-8 Evolution de la contrainte maximale pendant le 4^{ème} cycle en fonction de la vitesse de déformation pour la mousse A [JMA12]

Il a été utilisé les mêmes méthodes pour déterminer les vitesses limites de la mousse B et mousse C. Donc, les trois vitesses limites pour trois mousses (mousse A, mousse B et mousse C) que nous étudions ici sont données par le tableau II-4.

Tableau II-4 Vitesses limites entre quasi-statique et dynamique pour les mousses A, B et C [JMA12]

	Mousse A	Mousse B	Mousse C
Vitesse limite $\dot{\varepsilon}$ en sec^{-1}	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$

Pour caractériser le comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane, plusieurs essais de compression/décompression unidirectionnels sont menés sur la machine «Instron 33R4240» avec trois vitesses de déformation différentes: $1.06 \cdot 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$, $5.33 \cdot 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ et $6.66 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$. Les périodes peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon}{T} \quad (\text{II-2})$$

Les conditions des essais de compression/décompression appliquées aux trois mousses de polyuréthane sont résumées dans le tableau II-5.

Tableau II-5 Les conditions des essais de compression/décompression pour trois mousses

Tests	N_{cyc}	$\dot{\varepsilon}$ (sec ⁻¹)	ε_0 (%)	ε_{max} (%)	T (sec)	T_{ech} (sec)
Test 1	1	$1.06 \cdot 10^{-2}$	0	80	150	0.0625
Test 2	1	$5.33 \cdot 10^{-3}$	0	80	300	0.1250
Test 3	1	$6.66 \cdot 10^{-4}$	0	80	2400	2.0000

Le nombre minimal d'échantillons (N_{min}) pour les tests compression/décompression quasi-statique est déterminé par la méthode d'un niveau de confiance de 95% avec une limite pratique d'erreur qui ne doit pas excéder 10% afin d'assurer une bonne qualité de précision statistique de tous les paramètres. Un test préliminaire mené sur 15 échantillons a permis d'estimer la loi de probabilité de chaque paramètre pour chaque mousse à trois vitesses de déformation. Ensuite, l'équation II-3 a permis de déterminer le nombre minimal d'échantillons d'essai pour assurer la qualité statistique des paramètres.

$$N = \max_i \left(1 + \text{ceil} \left(\left(\frac{100}{SLE} \frac{u_i \hat{\sigma}_i}{\hat{m}_i} \right)^2 \right) \right) \quad (\text{II-3})$$

où $\hat{\sigma}_i$ et \hat{m}_i sont des valeurs d'écart-type et la moyenne estimative correspondant à i paramètres.

Le niveau de confiance que nous avons fixé permet la détermination d'un quantile à partir du tableau de probabilité approprié à la loi considérée pour le premier paramètre. La valeur moyenne et l'écart type préliminaires sont calculés à partir des résultats de la batterie d'essais préliminaires. Le nombre minimal d'essais pour chaque vitesse de déformation de trois mousses est ainsi donné par le tableau II-6.

Tableau II-6 Nombre minimal des échantillons utilisés pour trois vitesses et trois mousses

N	Test 1	Test 2	Test 3
Mousse A	17	37	15
Mousse B	17	37	17
Mousse C	15	26	17

2.3.3 Essais de compression multi cycles

Dans la norme sur les essais de compression (ASTM D3574, 2008), les échantillons sont comprimés jusqu'à 50% de leur épaisseur initiale par cycle. Cependant, le comportement mécanique présente une grande différence entre le premier cycle et le deuxième cycle. C'est-à-dire qu'il n'est pas suffisant pour déterminer le comportement quasi-statique de ne réaliser qu'un cycle. Pour cette raison, nous avons réalisés les tests de compression/décompression sur 5 cycles pour mettre en évidence les différences entre les différents cycles. La figure II-9 montre la contrainte à 50% pour les trois mousses du cycle 1 au cycle 5 dans le cas de Test 1. Comme la montre cette figure, la contrainte diminue avec l'augmentation de nombre de cycle. Les trois mousses montrent les mêmes tendances, même si ce phénomène est plus marqué sur la mousse A que la mousse B et la mousse C. Les résultats des tests à 50% de compression sur les trois mousses dans le cas du Test 2 et Test 3 ne sont pas présentés, car ils sont très similaires à celles du test 1.

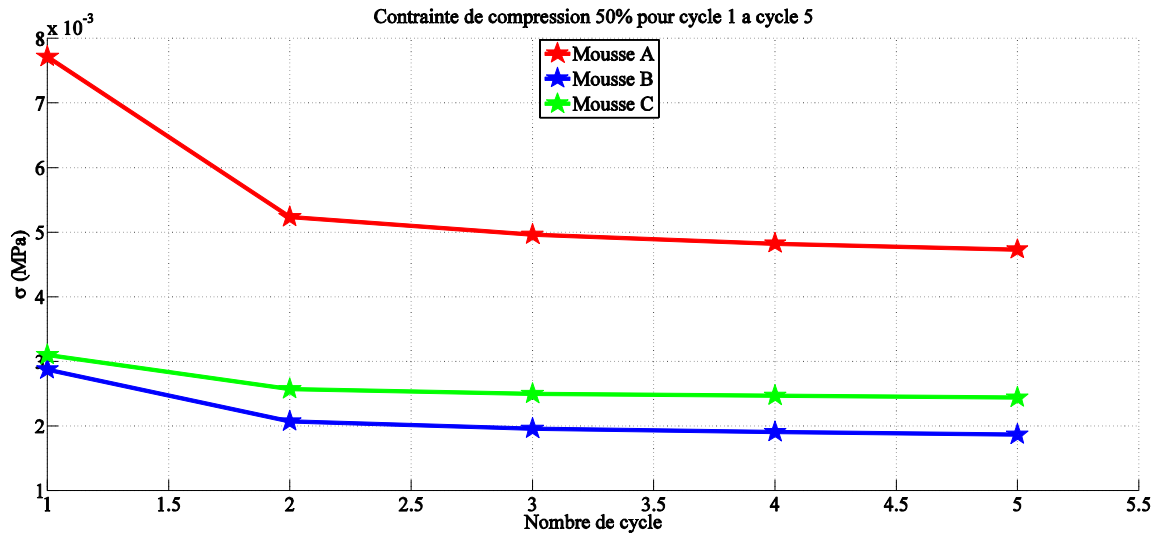


Figure II-9 Contrainte de 50% compression du cycle 1 au cycle 5 pour trois mousses

Le tableau II-7 présente les valeurs de contrainte de chaque cycle pour trois mousses et le tableau II-8 montre la variation de contrainte entre deux cycles successifs. Comme le montre la figure II-9 et les deux tableaux II-7 et II-8, la contrainte entre le premier cycle et le deuxième cycle est très différente, par contre, la contrainte ne présente pas de grande différence entre le deuxième cycle et le troisième cycle. Par la suite, entre le troisième cycle et le quatrième cycle, la contrainte montre peu de différence. A la fin, la contrainte est presque la même entre le quatrième cycle et le cinquième cycle. Donc, nous limiterons notre étude de compression/décompression multi-cycles au quatrième cycle.

Tableau II-7 Les valeurs de contrainte en MPa de chaque cycle pour les trois mousses A, B et C.

Cycle Mousse	1	2	3	4	5
A	7.7e-3	5.2 e-3	5.0 e-3	4.8 e-3	4.7 e-3
B	2.9e-3	2.1 e-3	2.0 e-3	1.9 e-3	1.9 e-3
C	3.1e-3	2.6 e-3	2.5 e-3	2.5 e-3	2.4 e-3

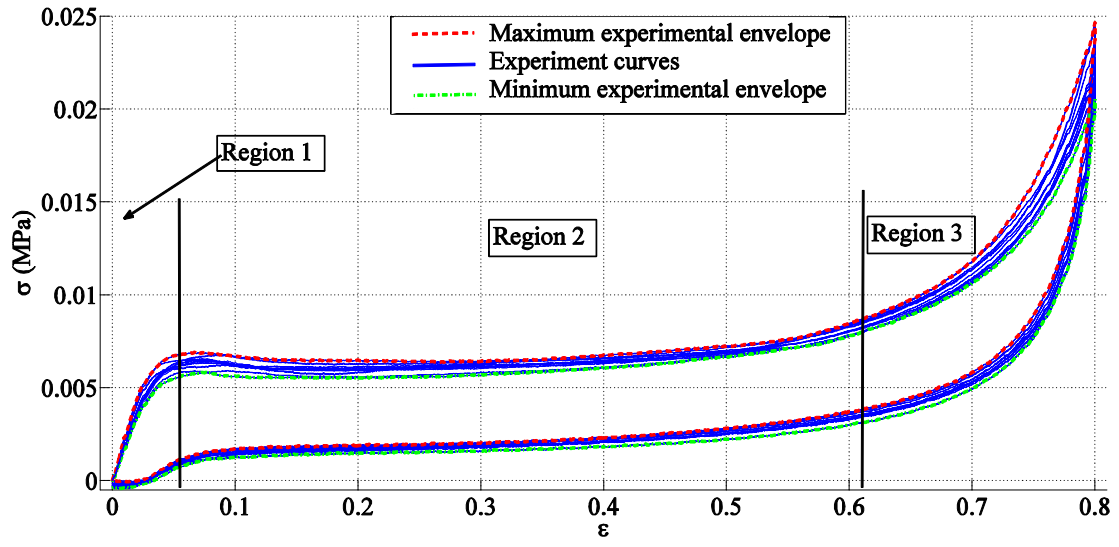
Tableau II-8 Variation entre cycles

	Cycle 1 et 2	Cycle 2 et 3	Cycle 3 et 4	Cycle 4 et 5
Mousse A	32.2%	5.3%	2.8%	1.8%
Mousse B	27.9%	5.5%	2.7%	1.9%
Mousse C	17.1%	2.8%	1.2%	1.1%

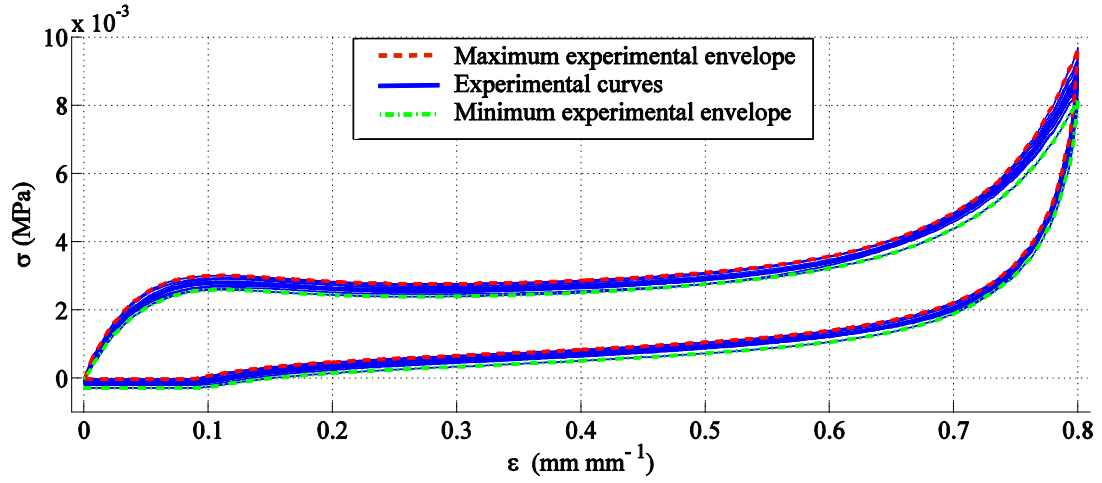
2.4 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous allons d'abord présenter les résultats expérimentaux de compression/décompression monocycle, et ensuite les résultats expérimentaux pour 4 cycles, ceci pour trois mousses à trois vitesses de déformation. Tous les échantillons ont le même historique mécanique et environnemental.

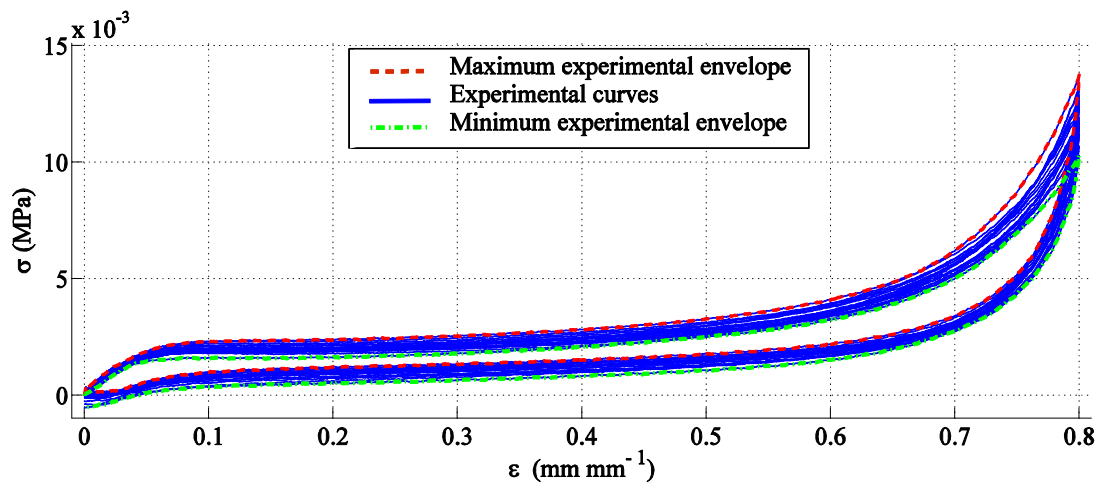
2.4.1 Résultats sur le premier cycle



(a)



(b)



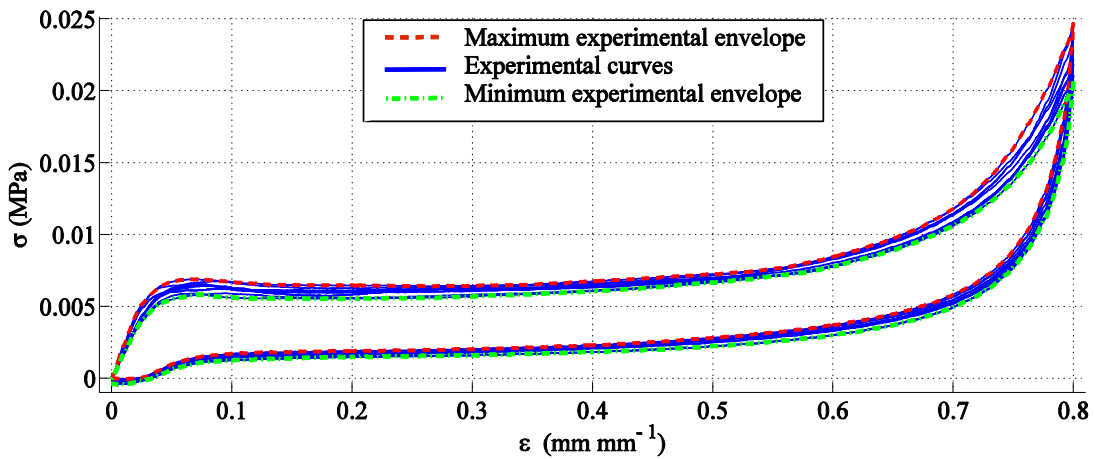
(c)

Figure II-10 Compression/décompression dans le cas de test 1: (a) mousse A; (b) mousse B; (c) mousse C

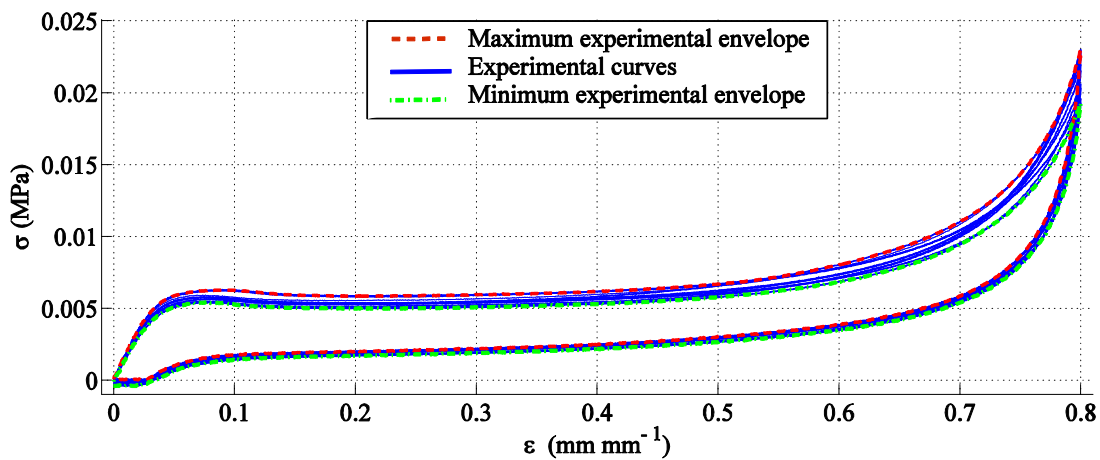
La figure II-10 montre les résultats expérimentaux de contrainte-déformation des trois mousses dans le cas de test 1. Nous pouvons clairement voir que la déformation de la mousse de polyuréthane pendant les essais compression/décompression unidirectionnels présente trois régions: la région quasi-linéaire (région 1), la région du plateau (région 2) et la région de densification (région 3).

Dans la première zone, la mousse de polyuréthane se déforme de manière hyperélastique linéaire en raison de la flexion de la paroi cellulaire, ce qui représente moins de 10% de la totalité de la déformation. Au cours de la deuxième étape, il existe un plateau de déformation à contrainte pratiquement constante. Les parois cellulaires, qui sont comme des tubes ou des plaques minces, perdent leur stabilité et provoquent de grandes déformations. Pendant cette phase de plateau, la mousse de polyuréthane est soumise à de grandes déformations de compression et absorbe une quantité considérable d'énergie spécifique.

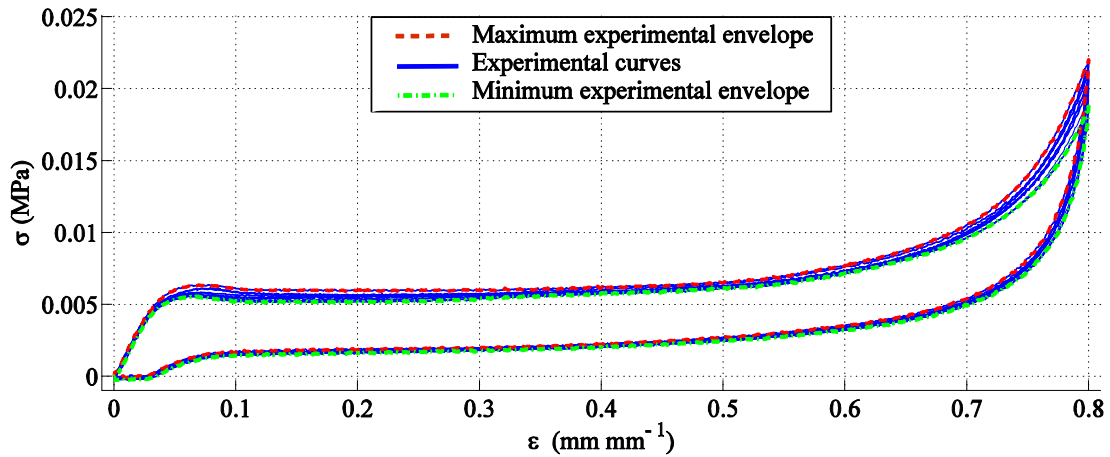
Dans la troisième région, une zone de densification se produit, où les parois cellulaires vont s'écraser les unes sur les autres, ce qui entraîne une augmentation rapide de la contrainte de compression.



(a)



(b)



(c)

Figure II-11 Contrainte/déformation de la mousse A : (a) test 1 ; (b) test 2 ; (c) test 3

La figure II-11 montre les courbes contrainte-déformation expérimentales pour la phase de charge et la phase de décharge de la mousse A à trois vitesses de déformation différentes (Test 1, Test 2 et Test 3). On peut voir sur la figure II-11 que les vitesses de déformation affectent les courbes expérimentales mais il y a peu de grande différence entre les trois tests. Cependant, il existe une grande différence de contrainte entre le chargement et le déchargement pour un même niveau de la déformation. Ce phénomène met en évidence le comportement viscoélastique des mousses de polyuréthane.

A partir des résultats expérimentaux ci-dessus, la conclusion correspond aux théories présentées dans le chapitre I: les mousses de polyuréthane présentent à la fois un comportement hyperélastique non linéaire et un comportement viscoélastique pendant l'essai de compression quasi-statique.

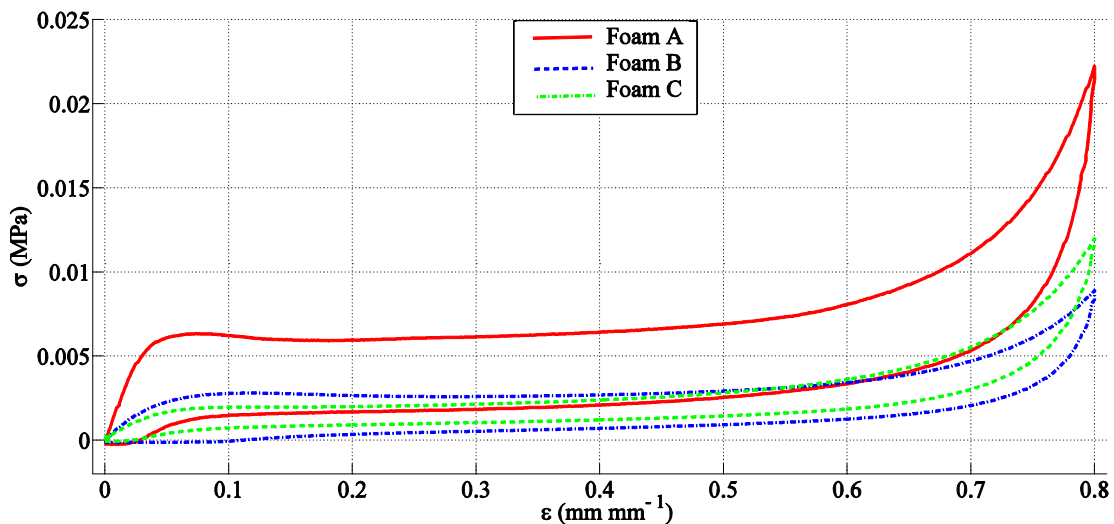


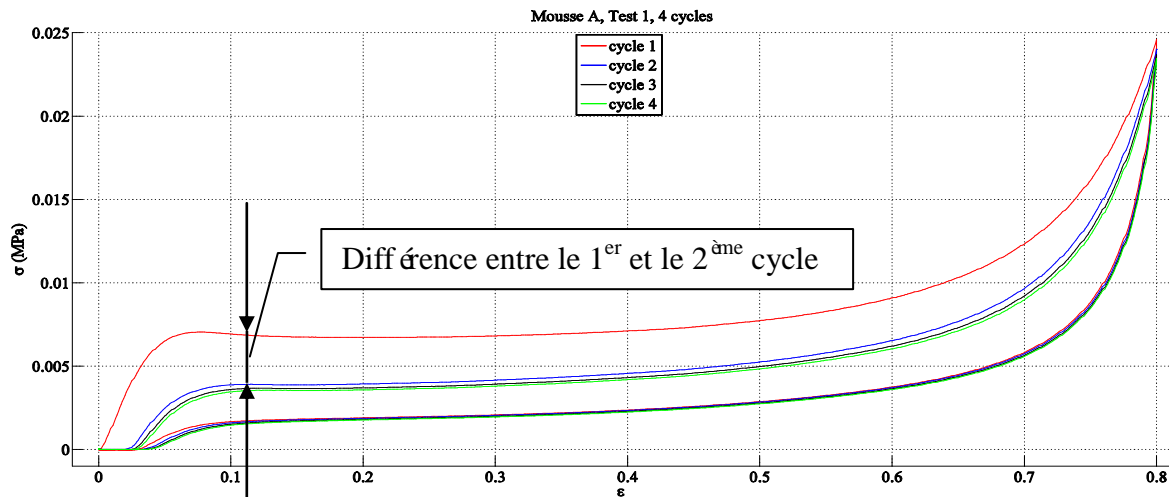
Figure II-12 Les résultats de comparaisons de trois mousses dans le cas de test 1

La figure II-12 montre la comparaison des courbes contrainte-déformation expérimentales pour trois mousses dans le cas de test 1. On peut voir dans cette figure que la zone située entre

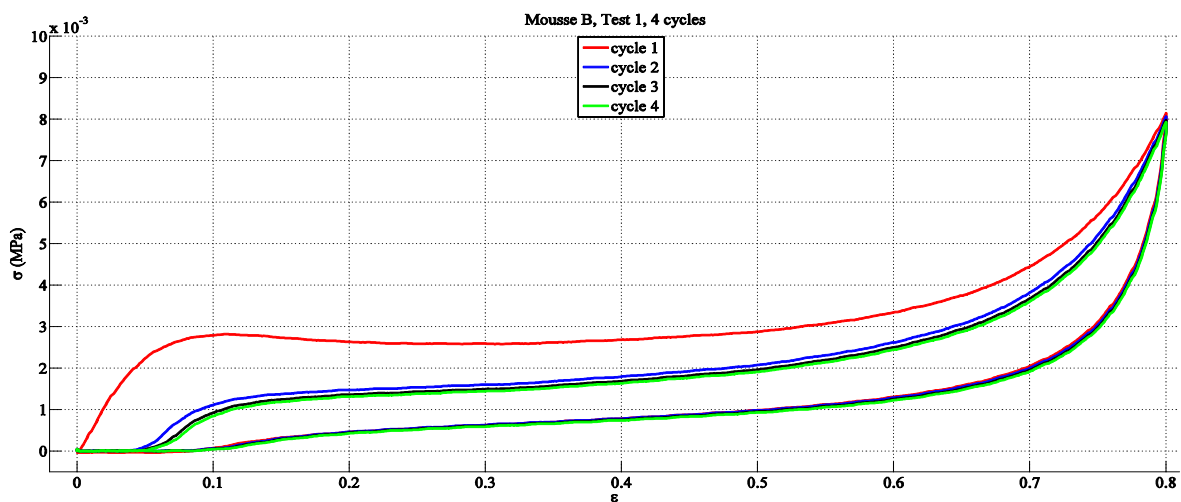
la courbe de charge et la courbe de déchargement pour trois mousses, ce qui représente l'énergie absorbée par les mousses, est différente. C'est-à-dire que les trois mousses ont des capacités différentes à absorber l'énergie de déformation. Nous pouvons aussi voir que la mousse A a la contrainte du plateau et la contrainte maximale les plus élevées de ces trois mousses. Elle a aussi la plus grande capacité à absorber l'énergie. La mousse B a une contrainte de plateau plus élevée que celle de la mousse C. Cependant la contrainte maximale de la mousse B est inférieure à celle de la mousse C.

2.4.2 Résultats sur les quatre cycles

Dans cette partie, nous présentons les résultats des essais de compression/décompression multi-cycles (quatre cycles) jusqu'à un niveau de compression final de 80% pour les trois mousses A, B et C. Les courbes déformation-contrainte expérimentales montrent une grande différence de contrainte entre le premier cycle et le deuxième cycle pendant la phase de charge pour une même déformation (Figure II-13), essentiellement pour les mousses A et B. A partir du deuxième cycle, la contrainte ne présente plus cette différence pendant la phase de charge.



(a)



(b)

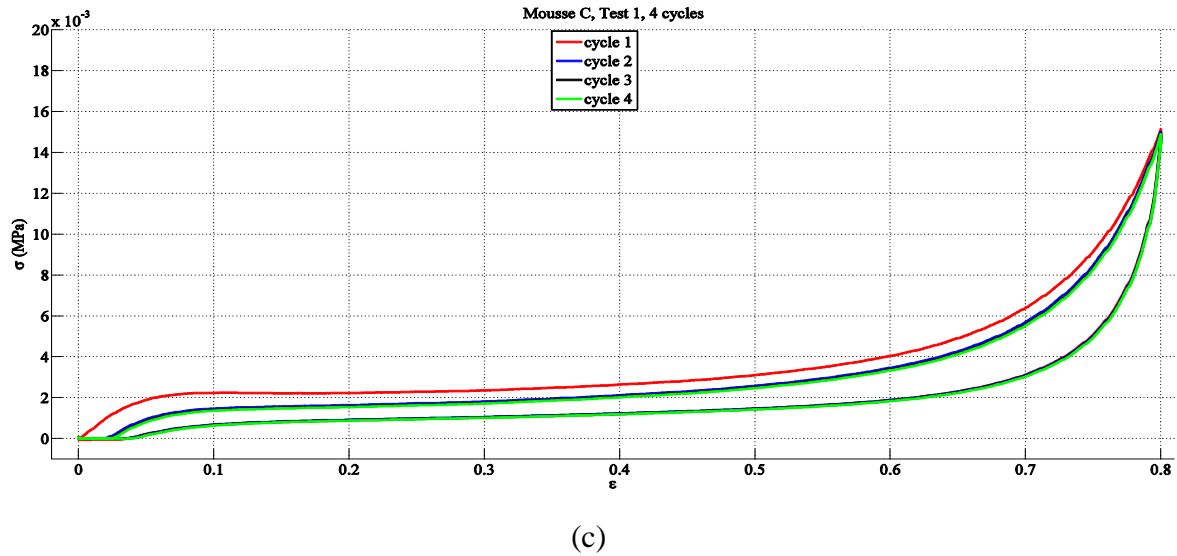
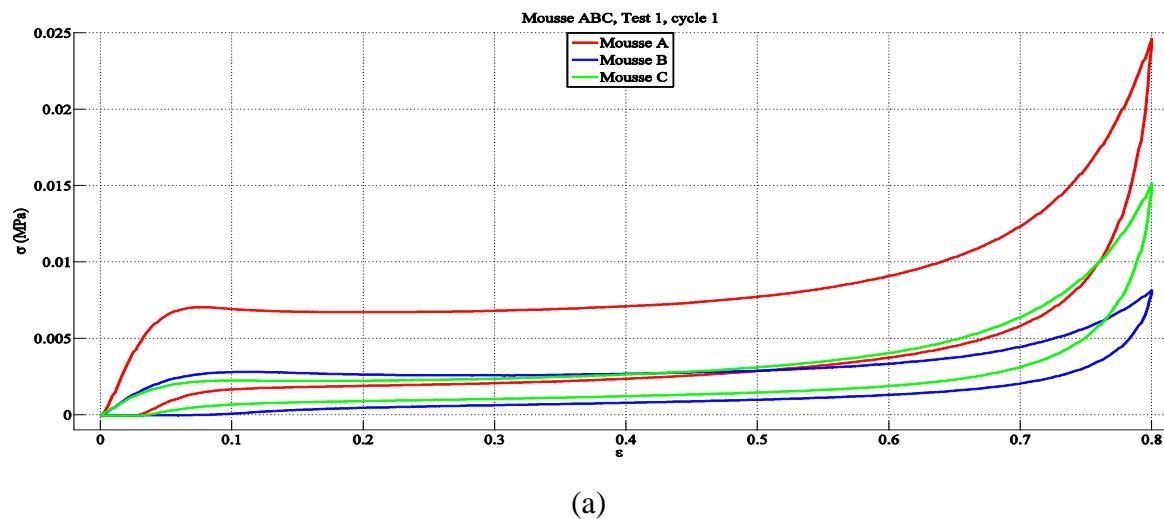


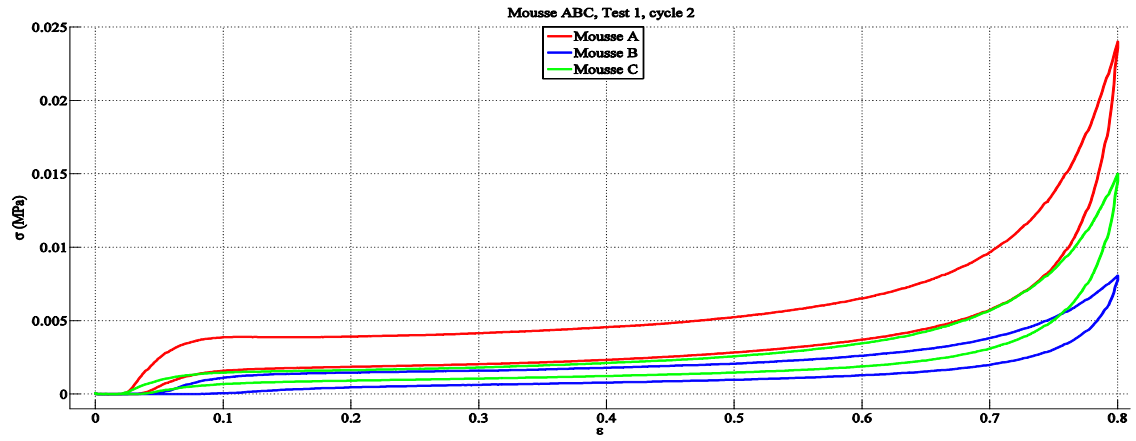
Figure II-13 Les résultats de 4 cycles pour trois mousses dans le cas de Test 1.

(a), mousse A; (b), mousse B; (c), mousse C

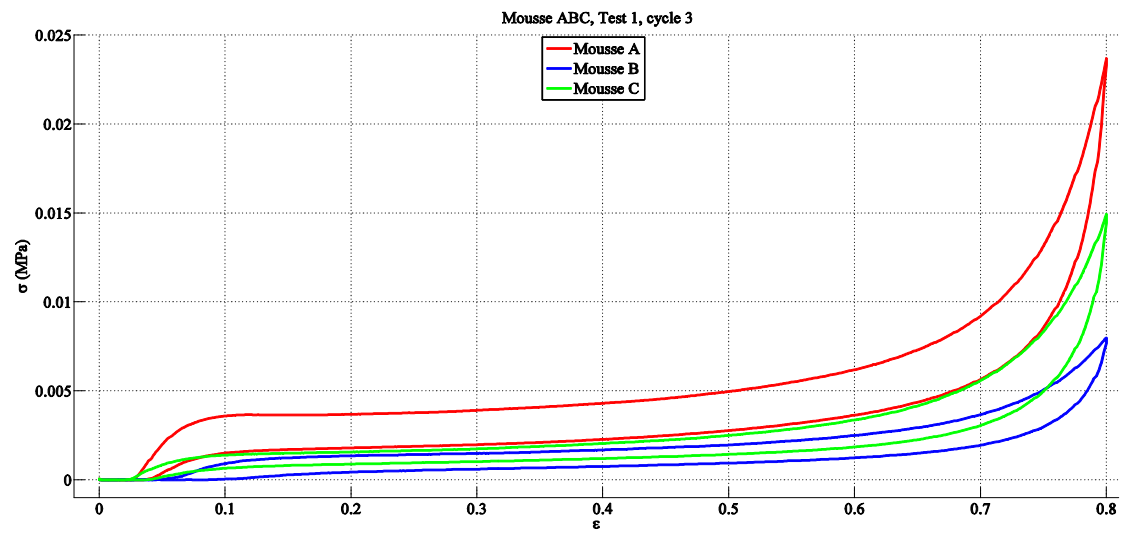
On constate aussi la présence d'hystérésis dans la réponse de la mousse, ceci met en évidence le comportement visco élastique de la mousse. De plus, les trois mousses A, B et C retournent à la fin de chaque cycle de compression/décompression à une position différente de l'état initial d'où la présence d'une déformation résiduelle. Cette déformation ne peut pas être considérée comme irréversible (c'est-à-dire plastique) car les mousses retrouvent leurs configurations initiales après deux jours de repos. On remarque pour les trois types de mousses A, B et C la déformation résiduelle du quatrième cycle est plus grande que celle des cycles 1, 2 et 3.

La figure II-14 présente les courbes contrainte-déformation des mousses A, B et C dans le cas du Test 1 sur chaque cycle. Les résultats de contrainte-déformation des trois mousses dans le cas du Test 2 et du Test 3 ne sont pas présentés, car ils sont très similaires à ceux du Test 1.

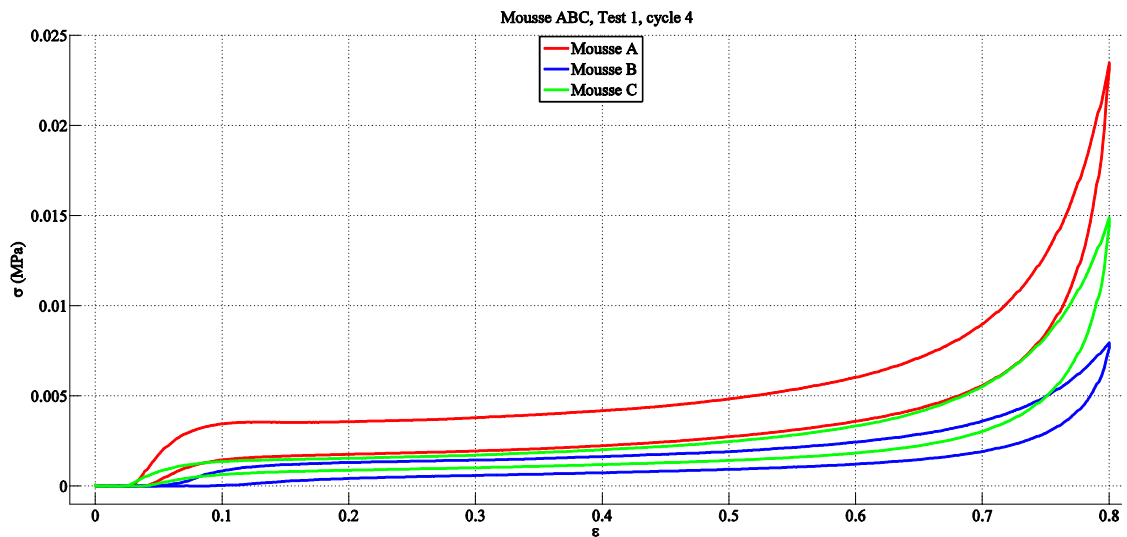




(b)



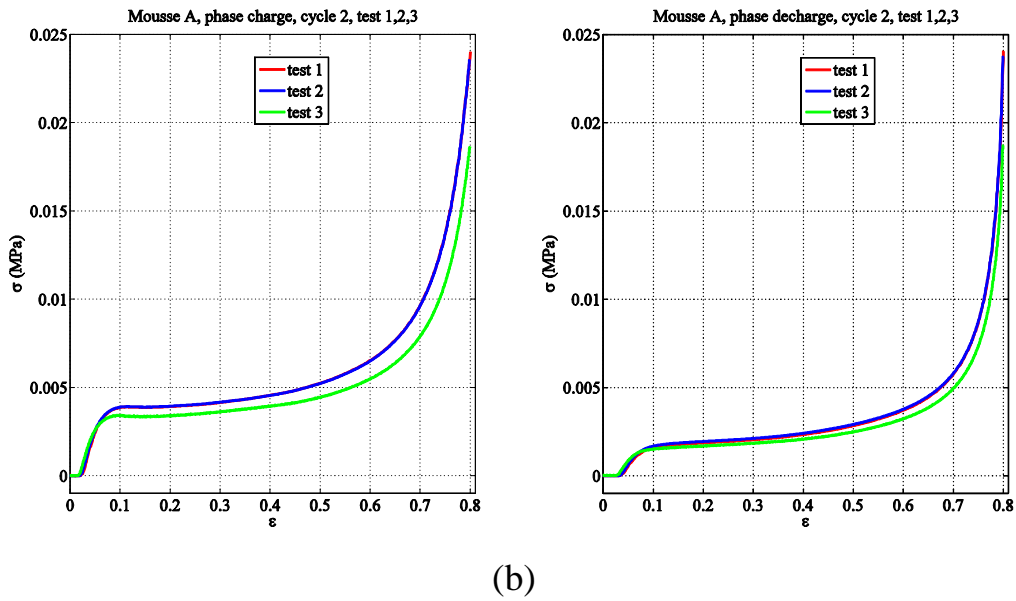
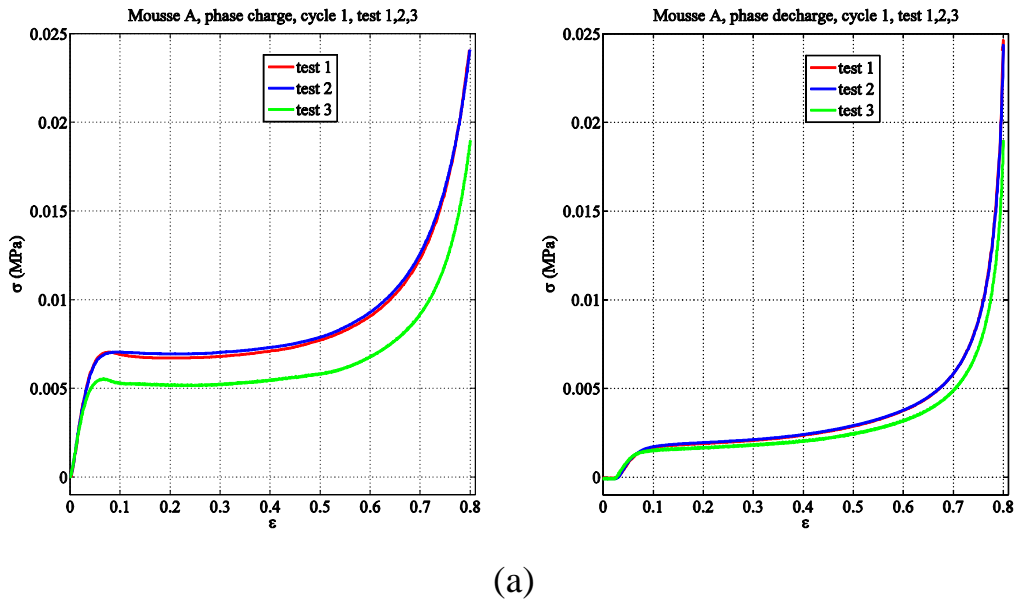
(c)



(d)

Figure II-14 Les résultats de trois mousses en chaque cycle dans le cas de test 1
(a), cycle 1; (b), cycle 2; (c), cycle 3; (d), cycle 4

D'après la figure II-14a, on remarque que la rigidité initiale de la mousse A dans la phase de charge du premier cycle est plus importante que celle de la mousse B, elle-même plus importante que celle de la mousse C. Dans le deuxième cycle (Figure II-14b), la mousse A reste la plus rigide des trois mousses, cependant, la mousse C devient plus rigide que la mousse B. Les mêmes observations ont été constatées pour la figure II-14c et la figure II-14d pour le cycle 3 et le cycle 4. Sur les figures II-13 et II-14, un cumul de déformation résiduelle en fonction des cycles pour les différentes mousses est montré. La différence entre le cycle 4 et le 5 n'est pas trop importante, ce qui nous permet de justifier l'étude de l'effet Mullins sur quatre cycles.



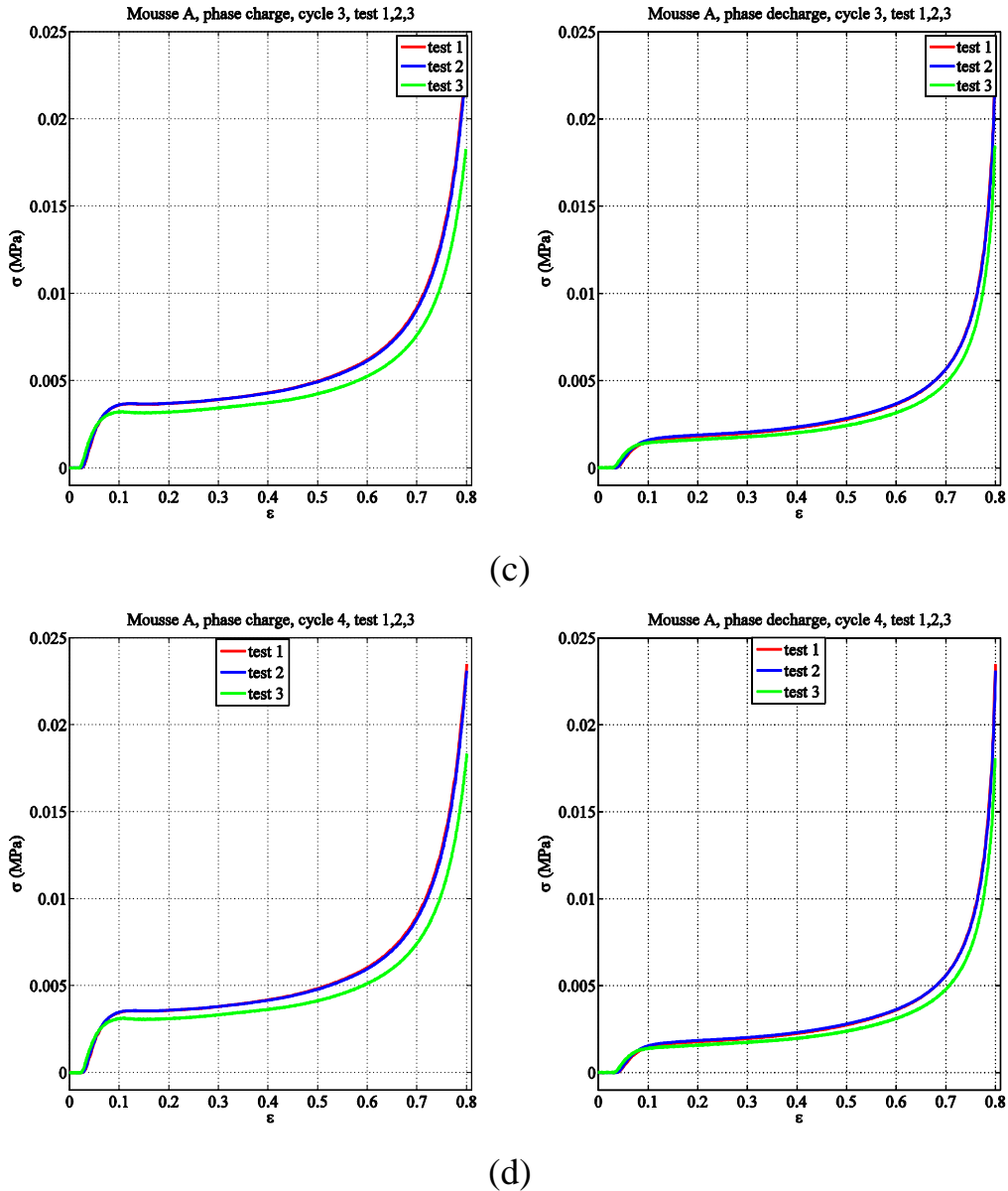


Figure II-15 Courbes charge (gauche) et décharge (droite) de la mousse A pour chaque cycle selon les trois tests

(a), cycle 1; (b), cycle 2; (c), cycle 3; (d), cycle 4

Figure II-15 présente les influences de la vitesse pour la mousse A sur 4 cycles. Les résultats de l'influence de la vitesse pour la mousse B et la mousse C ne sont pas présentés, car ils sont très similaires à ceux de la mousse A. L'influence de la vitesse pendant la phase de charge (courbes de gauche) est plus importante que pendant la phase de décharge (courbes de droite). La courbe pour la vitesse 1 ($1.06 \cdot 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$) et la courbe pour la vitesse 2 ($5.33 \cdot 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$) sont proches car ces deux vitesses ne sont pas très différentes. Cependant, on constate que la courbe pour la vitesse 3 ($6.66 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$) montre plus de différences que les courbes pour les vitesses 1 et 2. Elle montre aussi que l'influence de la vitesse pour chaque cycle est différente. En effet, comme le montre la figure II-15a et la figure II-15b, les courbes pour la vitesse 3 pendant la phase de charge sont très différentes. Par contre, elles ne présentent pas de grande différence pour les cycles suivants, c'est-à-dire l'influence de la vitesse semble jouer un rôle plus important sur le cycle 1 que sur les autres cycles.

2.5 Conclusion du chapitre II

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courbes contrainte-déformation provenant des essais de compression/décompression unidirectionnels monocycle et multi-cycles sur différents types de mousse de polyuréthane et pour différentes vitesses de sollicitation.

Dans le paragraphe 2.2 sur la caractérisation des mousses, nous avons présenté la géométrie et les dimensions des échantillons de mousses ainsi que la méthode de découpe, puis les masses volumiques et enfin la méthode de mesure de la porosité est détaillée pour déterminer les propriétés de porosité de la mousse.

Dans le paragraphe 2.3 sur les essais de compression/décompression monocycle, la machine «Instron 33R4240», les plages de vitesse, le taux de compression, le nombre d'échantillons, etc sont présentés. Cette étude a montré que la mousse de polyuréthane sous grandes déformations présente à la fois un comportement viscoélastique et un comportement hyperélastique non linéaire. Les courbes de contrainte-déformation entre les phases charge et les phases décharge sont très différentes, ce qui met en évidence le comportement viscoélastique des mousses.

Dans le paragraphe 2.4 sur les résultats de compression/ décompression, nous avons d'abord montré les résultats de 4 cycles pour trois mousses dans le cas de test 1. Les résultats montrent qu'il existe une grande différence de contrainte pour une même déformation entre le premier cycle et le deuxième cycle pendant la phase de charge. Ces phénomènes sont dus à l'effet Mullins. Pour cette raison, il est nécessaire et important pour faire l'étude du comportement multi-cycles. Par la suite, les résultats expérimentaux de chaque cycle pour trois mousses dans le test 1 sont présentés. Les rigidités de trois mousses sont étudiées et les déformations résiduelles sont aussi présentées par la comparaison de différents cycles. Enfin, nous avons montré les influences de la vitesse sur la mousse A pour chaque cycle. Il est montré que l'influence de la vitesse pour les phases de décharge est moins importante que les phases de charge. Pendant chaque cycle, l'influence de la vitesse est différente, cette dernière est plus importante pour le 1^{er} cycle que pour les cycles 2, 3 et 4.

Chapitre III: Comparaison de trois modèles visco-hyperélastiques

3.1 Introduction

Ce chapitre portera sur la modélisation et l'identification du comportement quasi-statique du premier cycle de compression/décompression de mousse de polyuréthane. La mousse de polyuréthane présente un comportement viscoélastique et un comportement hyperélastique pendant les essais de compression/décompression unidirectionnels selon les résultats expérimentaux du chapitre 2. Donc, il nous permet de modéliser leur comportement par deux parties : la partie de viscoélastique et la partie d'hyperélastique. Dans ce chapitre, nous utiliserons le modèle à mémoire entier pour la partie viscoélastique et trois modèles hyperélastiques, à savoir le modèle d'Ogden, le modèle polynomial et le modèle polynomial réduit, pour la partie hyperélastique. Les trois modèles globaux visco-hyperélastiques, à savoir le modèle visco-hyperélastique d'Ogden, le modèle visco-hyperélastique polynomial, le modèle visco-hyperélastique polynomial réduit, seront donnés par la combinaison du modèle viscoélastique (modèle à mémoire entier) et du modèle hyperélastique. Ils représentent les comportements globaux et seront comparés afin de choisir le plus adapté.

Ce chapitre est divisé en 3 sections : dans la première section, intitulée 'Modélisation et mise en œuvre', nous présenterons tout d'abord la modélisation du comportement viscoélastique par le modèle à mémoire entier, puis nous décrirons trois modèles hyperélastiques pour l'identification du comportement hyperélastique de la mousse de polyuréthane. Enfin, la méthode d'identification et l'approche d'optimisation seront présentées et détaillées.

Dans la deuxième section, les résultats des modélisations seront détaillés. Nous présenterons d'abord les résultats de modélisation du comportement viscoélastique obtenus par le modèle à mémoire entier, puis nous produirons les résultats de modélisation du comportement hyperélastique obtenus par les trois modèles hyperélastiques sur les trois mousses. Enfin, les résultats globaux donnés par les trois modèles globaux visco-hyperélastiques sur les trois mousses, seront détaillés.

Dans la dernière section, les comparaisons entre les trois modèles sur les trois mousses seront détaillées. Les comparaisons entre les trois mousses différentes seront également présentées. Les résultats des comparaisons nous permettront de conclure sur le meilleur modèle à utiliser pour la modélisation du comportement de l'effet de Mullins de la mousse de polyuréthane qui seront présentés dans le chapitre suivant (chapitre 4).

3.2 Modélisation et mise en œuvre

Comme la définition l'indique, la modélisation est un processus qui commence normalement par la réalisation d'expérimentations. Ensuite, ces expérimentations permettent de définir une structure mathématique modélisant les différents phénomènes physiques constatés. Les paramètres de la structure de modèle sont généralement inconnus. Il est nécessaire donc passer à l'identification de ces paramètres.

Pour notre étude, il a été supposé qu'il n'existe de déformation que dans un plan, qu'il n'y a pas de déformation hors du plan. Il n'existe pas de déformation latérale pendant les essais de compression /décompression unidirectionnels. C'est-à-dire que le coefficient de Poisson est supposé être nul. Cette hypothèse est déjà supposée par les travaux de Mills et al. [MIL00] et Widdle et al. [WID05].

Les mousses de polyuréthane sont supposées être homogènes avec une section constante en petite déformation. Cette hypothèse a été étendue aux grandes déformations par des chercheurs qui ont travaillé sur les modèles à mémoire macroscopiques. Selon les résultats expérimentaux du chapitre 2 et les résultats empiriques [WID08], les mousses de polyuréthane présentent à la fois un comportement hyperélastique non linéaires et un comportement viscoélastique. Afin de prédire le comportement mécanique de la mousse de polyuréthane, un modèle de visco-hyperélastique qui peut être décomposé en la somme d'une composante viscoélastique et un composant hyperélastique non linéaire, est nécessaire pour la modélisation du comportement mécanique de la mousse. La réponse totale de contrainte du modèle de visco-hyperélastique en compression unidirectionnelle est représentée par la formule suivante:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (\text{III-1})$$

où

σ : réponse totale

σ_e : réponse hyperélastique

σ_v : réponse viscoélastique

Les modèles de comportement hyperélastique non linéaires qui sont couramment utilisés dans l'étude des matériaux type caoutchouc, sont considérés ici pour représenter la contrainte hyperélastique. Pour la partie viscoélastique, un modèle à mémoire entier est utilisé pour décrire la contrainte viscoélastique.

Dans cette partie, nous allons présenter d'abord le comportement viscoélastique par le modèle à mémoire entier avec des paramètres de charge et de décharge différents, puis nous décrirons trois modèles hyperélastiques pour la modélisation du comportement hyperélastique de la mousse. Enfin, la méthode de la différence de contrainte et l'approche d'optimisation seront présentées.

3.2.1 Modélisation du comportement viscoélastique

La caractérisation du comportement viscoélastique de la mousse de polyuréthane lors d'un essai de compression/décompression à travers des modèles à mémoire peut être passée nécessairement par la modélisation du premier cycle et la modélisation de l'effet Mullins. Au cours de cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du premier cycle. La modélisation de l'effet de Mullins sera présentée dans le chapitre suivant.

Dans l'industrie, de nombreux matériaux présentent un comportement viscoélastique. Une des caractéristiques d'un matériau viscoélastique est que l'état actuel dépend de l'histoire de la déformation, ou d'une dépendance de temps de chargement. Pour une déformation unidirectionnelle, la contrainte prend la forme d'une convolution de la déformation avec un cœur viscoélastique:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \Gamma(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{III-2})$$

Concernant l'influence de l'histoire dans l'effet mémoire, on peut dire que le matériau a des pertes de mémoire, c'est-à-dire que l'histoire la plus récente de la déformation présente plus d'influence sur l'état actuel de la contrainte que la déformation antérieure.

Dans ce cas, $\Gamma(t)$ doit être une fonction décroissante en fonction du temps. Un choix satisfaisant pour le cœur de ce modèle prend la forme d'une somme de termes exponentiels,

$$\Gamma(t) = \sum_{l=1}^L a_l e^{-\beta_l t} \quad (\text{III-3})$$

où L est le nombre de termes exponentiels dans le cœur, et a_l et β_l sont les paramètres viscoélastiques des matériaux. Avec cette forme de cœur viscoélastique, l'équation III-2 devient

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \sum_{l=1}^L a_l e^{-\beta_l(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{III-4})$$

La contrainte et la déformation peuvent être décrites par une équation différentielle ordinaire suivante:

$$e_0 \sigma(t) + e_1 \dot{\sigma}(t) + e_2 \ddot{\sigma}(t) + \dots = p_0 \varepsilon(t) + p_1 \dot{\varepsilon}(t) + p_2 \ddot{\varepsilon}(t) + \dots \quad (\text{III-5})$$

Ou

$$e_0 \sigma(t) + e_1 \frac{d^1 \sigma(t)}{dt^1} + \dots + e_m \frac{d^m \sigma(t)}{dt^m} = p_0 \varepsilon(t) + p_1 \frac{d^1 \varepsilon(t)}{dt_1} + \dots + p_n \frac{d^n \varepsilon(t)}{dt^n} \quad (\text{III-6})$$

ou m et n sont entiers quelconques et $((e_i)_{i=0..m}, (p_i)_{i=0..n})$ sont des coefficients caractéristiques du matériau.

Comme il n'existe pas de contrainte ou de déformation pour un instant tel que $t < 0$. On peut appliquer une transformée de Laplace à l'équation III-6 qui donne le résultat suivant:

$$e_0 s^0 \bar{\sigma}(s) + e_1 s^1 \bar{\sigma}(s) + \dots + e_m s^m \bar{\sigma}(s) = p_0 s^0 \bar{\varepsilon}(s) + p_1 s^1 \bar{\varepsilon}(s) + \dots + p_n s^n \bar{\varepsilon}(s) \quad (\text{III-7})$$

où $\bar{\sigma}(s)$ est la transformée de Laplace de la contrainte $\sigma(t)$ et $\bar{\varepsilon}(s)$ est la transformée de Laplace de la déformation $\varepsilon(t)$. Sur l'équation III-7, $\bar{\sigma}(s)$ devient :

$$\bar{\sigma}(s) = \frac{p_0 s^0 + p_1 s^1 + \dots + p_n s^n}{e_0 s^0 + e_1 s^1 + \dots + e_m s^m} \bar{\varepsilon}(s) \quad (\text{III-8})$$

Si $m > n$, et les racines de dénominateur sont uniques, alors l'équation III-8 peut être étendue avec des fractions partielles et s'écrire de la façon suivante :

$$\bar{\sigma}(s) = \sum_{i=1}^I \frac{a_i}{\beta_i + s} \bar{\varepsilon}(s) \quad (\text{III-9})$$

où a_i et β_i sont des constantes qui peuvent être réelles ou complexes.

En prenant la transformée inverse de Laplace et appliquant le théorème de convolution, l'équation III-9 devient :

$$\sigma(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^I a_i e^{-\beta_i(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{III-10})$$

De nombreux modèles macroscopiques sont utilisés pour décrire le comportement viscoélastique, tel que le modèle de Maxwell, le modèle de Kelvin Voigt et le modèle de Zener. Dans notre travail, la contrainte viscoélastique est représentée par un modèle à mémoire (Equation III-10) avec des paramètres différents entre la charge et la décharge. Les expressions du modèle à mémoire pour le chargement et le déchargement sont données par les équations III-11 et III-12 (L pour Load et UL pour Unload) :

$$\sigma_L(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^I a_i^L e^{-\beta_i^L(t-\tau)} \varepsilon^L(\tau) d\tau \quad (\text{III-11})$$

$$\sigma_{UL}(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^I a_i^{UL} e^{-\beta_i^{UL}(t-\tau)} \varepsilon^{UL}(\tau) d\tau \quad (\text{III-12})$$

L'équation III-11 représente le chargement et l'équation III-12 représente le déchargement.

3.2.2 Modélisation du comportement hyperélastique des mousses

Les lois de comportement hyperélastique sont généralement utilisées pour modéliser des matériaux qui ont une réponse hyperélastique lorsqu'ils sont soumis à de très grandes déformations. Dans la théorie et pour décrire le phénomène de l'hyperélasticité, il existe une fonction 'énergie de déformation', notée $W = W(F)$ où F est le tenseur de déformation, $\lambda_i (i=1,2,3)$ sont les allongations principales tronçons et données par $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ (ε_i est la déformation et pour les essais compression/décompression $\varepsilon_i < 0$). Dans ce travail, la fonction énergie de déformation est utilisée et la contrainte peut être dérivée de la fonction par:

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{J} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (\text{III-13})$$

où J est le déterminant du gradient de la déformation. Il peut être exprimé de la façon suivante:

$$J = \frac{\rho_0}{\rho} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (\text{III-14})$$

où ρ_0, ρ sont respectivement les densités dans la configuration de référence et dans la configuration actuelle. La déformation des échantillons pendant les essais compression/décompression est donnée par la figure III-1. D'après l'hypothèse ci-dessus, la surface de section transversale de l'échantillon de mousse reste inchangée. Nous avons supposé que les matériaux sont homogènes et la déformation est uniforme tout au long de l'échantillon par la direction Y dans la figure III-1, il n'existe pas de déformation ni dans la direction X ni dans la direction Z et le matériau a un coefficient de Poisson nul.

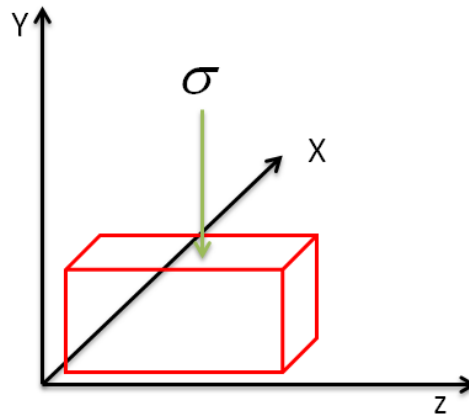


Figure III-1 Déformation d'échantillon

Dans cette étude, la déformation est une compression unidirectionnelle et la direction de compression est également la direction principale de la déformation. Pour l'élaboration des modèles, supposons que l'allongation principale λ_2 (coordonnée Y) corresponde à la direction de compression, donc, les contraintes dans les directions X et Z sont nulles (Equation III-15).

$$\sigma_1 = \sigma_3 = 0 \quad (\text{III-15})$$

Pour un matériau isotropique, on a supposé ci-dessus que les déformations dans la direction X et la direction Z sont négligeables (figure III-1) (λ_1 coordonné X, λ_3 coordonné Z). Donc,

$$\lambda_1 = \lambda_3 = 1 \quad (\text{III-16})$$

3.2.2.1 Modèle d'Ogden

Le modèle hyperélastique développé par Ogden est largement utilisé pour les matériaux compressibles et la fonction de l'énergie de déformation, W , est donnée par:

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + F(J) \quad (\text{III-17})$$

avec μ_n, α_n sont des paramètres matériaux, $F(J)$ est la fonction volumétrique.

Pour des raisons pratiques, la somme de l'équation III-17 est limitée à un nombre fini de termes. Par souci de cohérence avec la théorie classique, le module de cisaillement du matériau μ_0 peut être déduit par:

$$2\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \alpha_i \quad (\text{III-18})$$

Sur la base des équations III-13, III-15, III-16 et III-17, la contrainte pour le modèle Ogden peut être obtenue par:

$$\sigma_2 = \lambda_2^{-1} \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_2^{\alpha_n} + F'(J) \quad (\text{III-19})$$

La solution de substitution $F'(J)$ pour l'équation III-19 peut être donnée par :

$$\sigma_2 = \lambda_2^{-1} \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_2^{\alpha_n} - 1) \quad (\text{III-20})$$

3.2.2.2 Modèle polynomial

Le modèle hyperélastique polynomial est un modèle phénoménologique de l'élasticité du caoutchouc. Ce modèle peut également décrire les propriétés hyperélastiques d'autres matériaux. Dans ce modèle, la fonction de densité d'énergie de déformation est de la forme d'un polynôme avec deux invariants I_1, I_2 du tenseur de déformation de Cauchy-Green. Pour les matériaux compressibles, une dépendance à l'égard du volume est ajoutée, et la fonction de densité d'énergie de déformation pour le modèle polynomial est :

$$W = \sum_{i,j=1}^N C_{ij} \left(\bar{I}_1 - 3 \right)^i \left(\bar{I}_2 - 3 \right)^j + \sum_{i=1}^N D_i (J - 1)^{2i} \quad (\text{III-21})$$

où

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= J^{-2/3} I_1; \quad I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \\ \bar{I}_2 &= J^{-4/3} I_2; \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2; \\ J &= \det(F) \end{aligned} \quad (\text{III-22})$$

F est le tenseur de gradient de la déformation. Lorsque $N = 1$, le modèle se réduit au modèle de Mooney - Rivlin compressible :

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + D_1(J - 1)^2 \quad (\text{III-23})$$

Lorsque $N=2$, l'équation est la suivante:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + D_1(J - 1)^2 + D_2(J - 1)^4 \quad (\text{III-24})$$

Pour faire une comparaison avec d'autres modèles, le modèle d'ordre supérieur ($N = 3$), même s'il est rarement utilisé, est également considéré ici et sa forme est la suivante :

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + C_{21}(\bar{I}_1 - 3)^2(\bar{I}_2 - 3) + C_{12}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{03}(\bar{I}_2 - 3)^3 + D_1(J - 1)^2 + D_2(J - 1)^4 + D_3(J - 1)^6 \quad (\text{III-25})$$

Les relations contrainte-déformation peuvent être calculées pour le modèle de Mooney-Rivlin ($N = 1$), la forme polynomiale avec $N = 2$ et $N = 3$ par des équations III-13, III-15, III-16, III-23, III-24 et III-25.

3.2.2.3 Modèle polynomial réduit

La forme particulière de l'équation III-21 peut devenir le modèle polynomial réduit par la mise à zéro des coefficients spécifiques. Si tous les coefficients C_{ij} avec $j \neq 0$ sont mis à zéro, le modèle polynomial réduit est obtenu et s'écrit:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} \left(\bar{I}_1 - 3 \right)^i + \sum_{i=1}^N D_i (J - 1)^{2i} \quad (\text{III-26})$$

Lorsque $N=1$, la forme néo-Hookean est obtenue :

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + D_1(J - 1)^2 \quad (\text{III-27})$$

Ce modèle est le plus simple, il est souvent utilisé en première approche pour les matériaux élastomères.

Avec $N = 2$, la fonction d'énergie de déformation de modèle polynomial réduit est représentée par:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + D_1(J - 1)^2 + D_2(J - 1)^4 \quad (\text{III-28})$$

et pour $N = 3$, elle peut s'écrire sous la forme :

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + D_1(J - 1)^2 + D_2(J - 1)^4 + D_3(J - 1)^6 \quad (\text{III-29})$$

La relation contrainte-déformation est obtenue par les équations III-13, III-15, III-16, III-27, III-28 et III-29.

3.2.3 Méthodes d'identification et approches d'optimisation

3.2.3.1 Méthodes d'identification

Dans le premier chapitre nous avons présenté deux méthodes d'identification issues de la littérature permettant de déterminer les paramètres de modèles à mémoire: la méthode de la contrainte-moyenne [IPP08] et la méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge [DEN04]. Dans notre travail, nous utilisons la méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge qui est basée sur la symétrie de la contrainte hyperélastique entre la charge et la décharge. La méthode d'identification est donnée par la figure III-2.

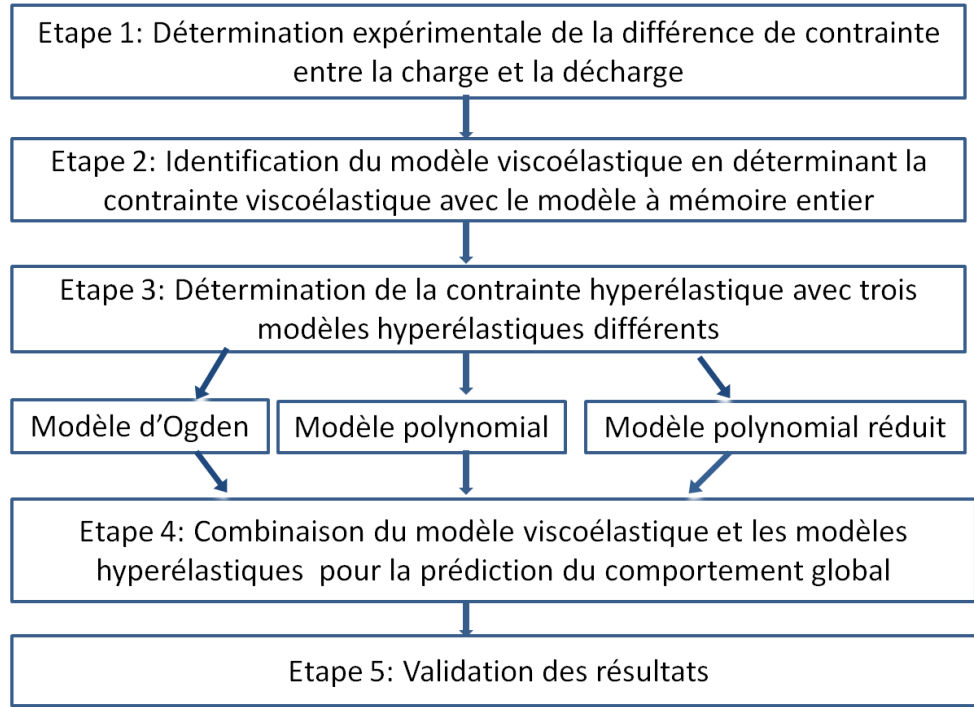


Figure III-2 Méthodes d'identification

Suite aux équations III-11 et III-12, les paramètres viscoélastiques sont présents dans l'expression analytique de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pendant le premier cycle par l'équation

$$\sigma_v(t) = \begin{cases} \int_0^t \sum_{i=1}^2 a_i^L e^{-\beta_i^L(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^L e^{-\beta_i^L(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{UL} e^{-\beta_i^{UL}(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (\text{III-30})$$

Dans l'essai de compression/décompression unidirectionnelle, les vitesses de déformation sont une constante dans le processus de chargement et de déchargement. La fonction de déformation dans la phase de chargement et de déchargement peut être définie comme:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon(\tau)_{load} &= \frac{2\varepsilon_{max}}{T} \tau & \left(0 \leq \tau \leq \frac{T}{2}\right) \\
 \varepsilon(\tau)_{unload} &= -\frac{2\varepsilon_{max}}{T} \tau + 2\varepsilon_{max} & \left(\frac{T}{2} \leq \tau \leq T\right)
 \end{aligned} \tag{III-31}$$

où ε_{max} est la déformation maximale et T est la période d'essai.

Ainsi, la relation entre la déformation et le temps est linéaire et la courbe obtenue est un triangle isocèle (Figure III-3).

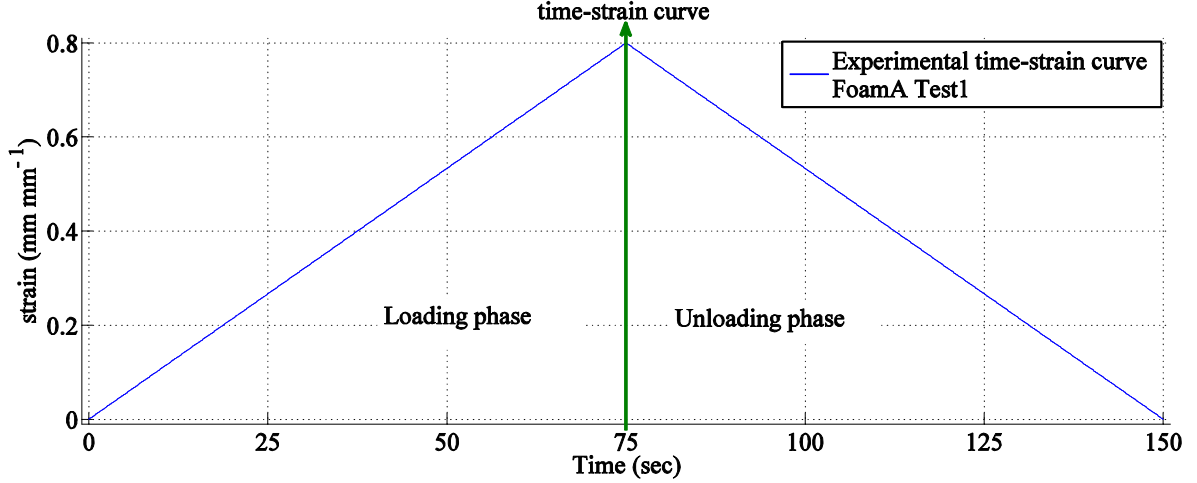


Figure III-3 Relation de déformation-temps

Sur la base de la symétrie de la contrainte hyperélastique pour la charge et la décharge, la méthode de la différence de contrainte est utilisée pour identifier les paramètres viscoélastiques. Selon les équations III-30 et III-31, la différence de contrainte entre les phases de chargement et de déchargement est donnée par:

$$\begin{aligned}
 \delta\sigma_v &= \sigma_{v_load} - \sigma_{v_unload} \\
 &= \int_0^{t_1} \sum_{i=1}^I a_i e^{-\beta_i(t_1-\tau)} \frac{2\varepsilon_{max}}{T} \tau d\tau - \int_0^{t_2} \sum_{i=1}^I a_i e^{-\beta_i(t_2-\tau)} \left(-\frac{2\varepsilon_{max}}{T} \tau + 2\varepsilon_{max} \right) d\tau
 \end{aligned} \tag{III-32}$$

où $t_1 \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$ et $t_2 \in \left[\frac{T}{2}, T\right]$ sont les temps de chargement et déchargement, respectivement.

Afin d'assurer une représentativité plus générale des modèles à mémoire entier dans notre processus de modélisation, leurs paramètres dimensionnels qui dépendent des conditions d'essai ont été remplacés par des paramètres adimensionnels. La relation entre les paramètres dimensionnels et les paramètres adimensionnels est donnée par tableau III-1 [JMA12].

Tableau III-1. Transformations des paramètres dimensionnels en paramètres adimensionnels

Paramètres viscoélastique dimensionnels	Paramètres viscoélastique adimensionnels
$Y(1) = \text{Re}(\beta_1)$	$X(1) = Y(1)T$
$Y(2) = \text{Im}(\beta_1)$	$X(2) = Y(2)T$
$Y(3) = \text{Re}(a_1)$	$X(3) = \frac{Y(3)}{\sigma_{ex_max}} \varepsilon_{max} T$
$Y(4) = \text{Im}(a_1)$	$X(4) = \frac{Y(4)}{\sigma_{ex_max}} \varepsilon_{max} T$
$Y(5) = \text{Re}(\beta_2)$	$X(5) = Y(5)T$
$Y(6) = \text{Im}(\beta_2)$	$X(6) = Y(6)T$
$Y(7) = \text{Re}(a_2)$	$X(7) = \frac{Y(7)}{\sigma_{ex_max}} \varepsilon_{max} T$
$Y(8) = \text{Im}(a_2)$	$X(8) = \frac{Y(8)}{\sigma_{ex_max}} \varepsilon_{max} T$

3.2.3.2 Approches d'optimisation

Les méthodes d'optimisation sont utilisées comme outils de base pour identifier les paramètres viscoélastiques et les paramètres hyperélastiques des modèles de mousses de polyuréthane. Les données expérimentales de contrainte-déformation sont obtenues à partir des essais de compression/décompression unidirectionnelle. L'erreur quadratique moyenne entre les données expérimentales et les données de modèle peut donc être calculée en utilisant la fonction:

$$f = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\sigma_m(\varepsilon_e) - \sigma_e(\varepsilon_e)]^2} \quad (\text{III-33})$$

où $\sigma_m(\varepsilon_e)$ est la contrainte donnée par le modèle et $\sigma_e(\varepsilon_e)$ est la contrainte obtenue expérimentalement.

L'objectif de l'optimisation est de trouver la meilleure combinaison de paramètres du modèle qui minimise la fonction f . Les paramètres de l'équation III-32 ont été estimés en utilisant une méthode d'optimisation non linéaire des moindres carrés. L'optimisation de la boîte à outils de MATLAB est utilisée ici pour la minimisation. Il existe des méthodes déterministes et aléatoires pour l'optimisation. La méthode de région de confiance, la méthode de Levenberg-Marquardt et la méthode de dégradé sont trois exemples de méthodes déterministes qui sont efficaces lorsque la fonction objective (fonction à optimiser) change rapidement. Dans le présent document, la méthode de région de confiance est utilisée pour l'algorithme de descente. Les meilleurs paramètres doivent être choisis de manière à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre les données expérimentales et analytiques et satisfaire la condition à la limite, en utilisant le solveur LSQNONLIN avec des critères d'arrêt serrés.

3.3 Résultats de la modélisation du comportement mécanique

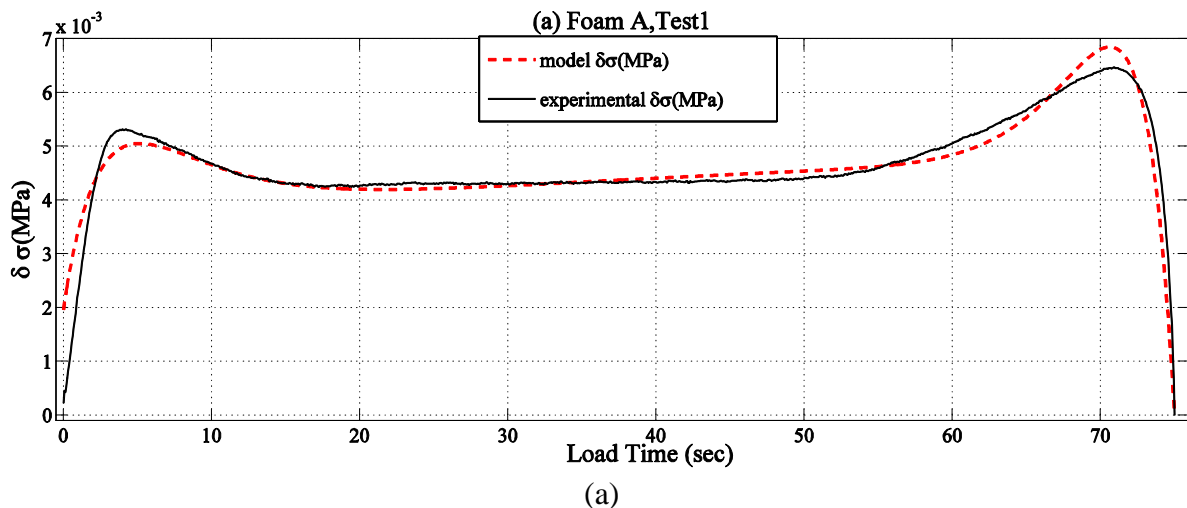
3.3.1 La viscoélasticité (modèle à mémoire entier)

Le modèle à mémoire entier est utilisé pour la modélisation du comportement viscoélastique de la mousse de polyuréthane. Nous avons considéré pour notre modèle à mémoire entier des paramètres adimensionnels au lieu des paramètres dimensionnels afin de conférer un niveau de représentativité plus général (Tableau III-1). Ces paramètres sont considérés différents entre la charge et la décharge. Les valeurs d'identification des paramètres adimensionnels du modèle à mémoire entier pour les trois mousses A B et C et pour les trois tests sont regroupés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 Les paramètres viscoélastiques adimensionnels

		X (1)	X (2)	X (3)	X (4)	X (5)	X (6)	X (7)	X (8)
Foam A	Test 1	41.72	0.174	-219.81	22023.94	42.64	0.178	-223.62	22027.07
	Test 2	40.59	0.173	-215.79	22023.94	41.42	0.174	-217.36	22027.07
	Test 3	43.38	0.173	-214.46	22023.94	44.38	0.178	-218.35	22027.07
Foam B	Test 1	29.26	0.082	-147.49	22238.66	30.59	0.084	-150.01	22238.66
	Test 2	29.72	0.081	-147.14	22238.66	30.99	0.082	-149.44	22238.66
	Test 3	31.84	0.096	-155.69	22238.66	32.89	0.097	-157.10	22238.66
Foam C	Test 1	37.72	0.094	-118.87	22024.80	38.51	0.099	-124.67	22027.34
	Test 2	41.35	0.133	-153.02	22024.79	41.93	0.141	-159.06	22027.34
	Test 3	44.73	0.128	-136.02	22024.79	45.05	0.136	-141.78	22027.34

Comme le montre dans le tableau III-2, les valeurs des paramètres viscoélastiques sont différentes entre la charge et la décharge. Afin de valider ces résultats, il est nécessaire de vérifier les différences entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux. On constate à partir de la figure III-4 que la courbe de différence de contrainte entre la charge et la décharge obtenue par le modèle présente uniquement un décalage initial par rapport à la courbe expérimentale. Elle montre aussi que la courbe du modèle présente un bon accord avec la courbe expérimentale de la différence de contrainte entre la phase de charge et décharge.



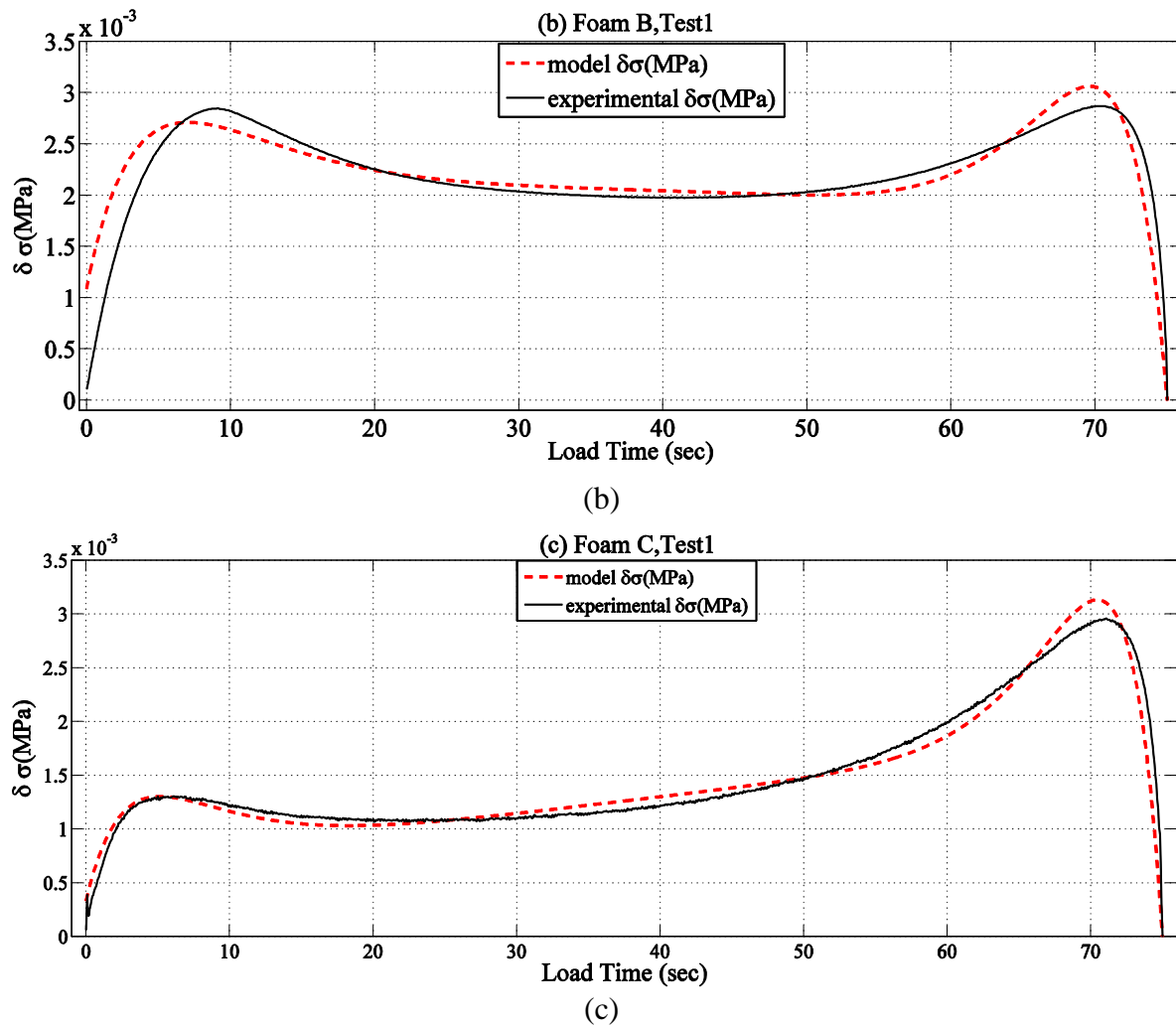


Figure III-4 Différence de contrainte entre la charge et la décharge (modélisation et expérimentation). (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C.

On peut également voir dans la figure III-4 que les trois mousses présentent un comportement viscoélastique différent à la même vitesse de déformation (test 1). Les résultats de la différence de contrainte entre la charge et la décharge sur les trois mousses différentes dans le cas du test 2 et test 3 ne sont pas donnés, car ils sont similaires à ceux du test 1.

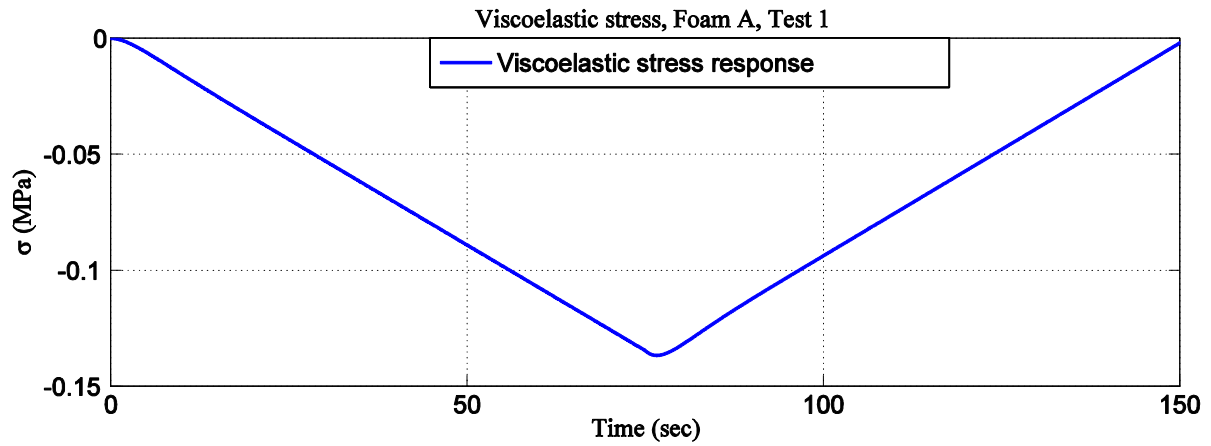
Globalement, l'estimation est acceptable et les erreurs relatives sont données par le tableau III-3 et l'erreur relative maximale entre les courbes expérimentale $\delta\sigma_e$ et analytique $\delta\sigma_m$ ne dépasse pas 8 %.

Tableau III-3. Erreurs relatives de la viscoélasticité

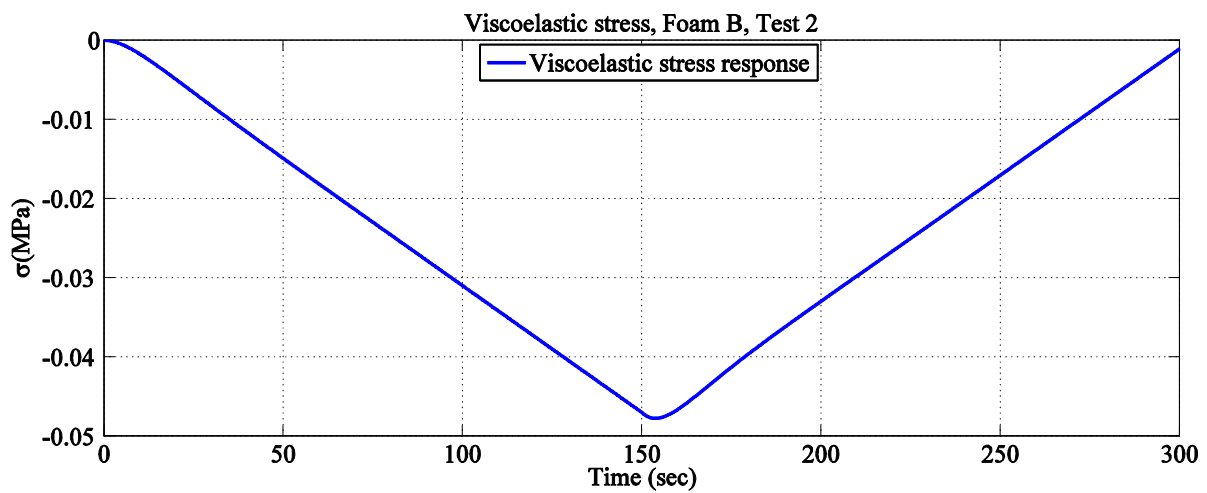
	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	5.77%	6.25%	6.79%	6.06%	5.32%	4.66%	6.92%	7.65%	7.97%

Avec les paramètres viscoélastiques obtenus par le modèle à mémoire entière (tableau III-2), les contraintes viscoélastiques des trois mousses différentes sur les trois vitesses sont présentes par la figure III-5. La figure III-5 présente la contrainte viscoélastique de la mousse A dans le cas du test 1, la mousse B dans le cas du test 2 et la mousse C dans le cas du test 3. Les contraintes viscoélastiques sont de signe négatif. Donc, on peut déduire que le

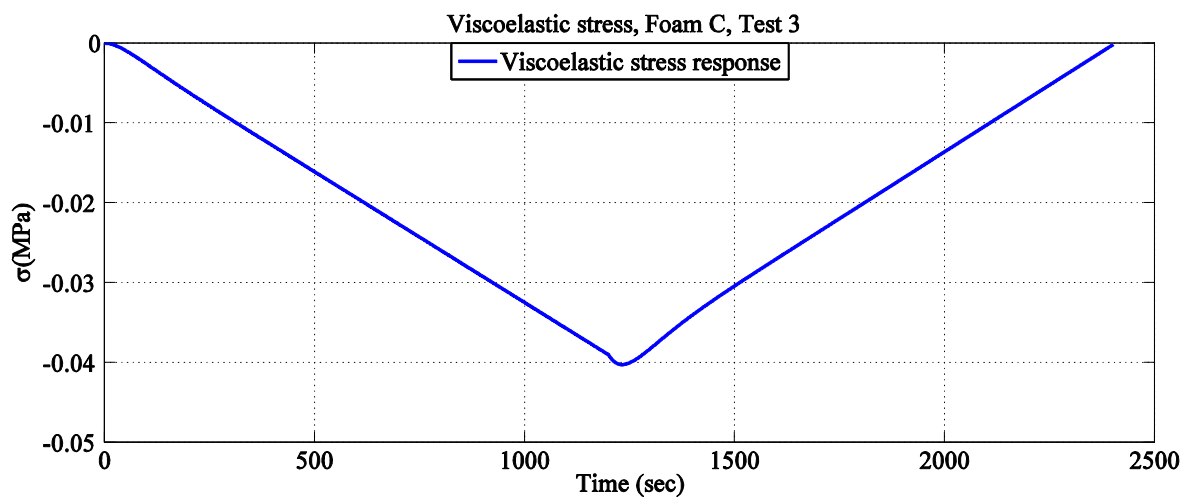
comportement viscoélastique modélise l'effet de relaxation, ce qui explique la contrainte résiduelle non permanente à la fin du test.



(a)



(b)



(c)

Figure III-5 Contrainte viscoélastique. (a) Mousse A in test 1; (b) Mousse B in test 2; (c) Mousse C in test 3.

3.3.2 L'hyperélasticité (Modèle d'Ogden, modèle polynomial, modèle polynomial réduit)

3.3.2.1 Modèle d'Ogden

Comme le comportement viscoélastique a déjà été obtenu précédemment dans la section 3.3.1, le comportement hyperélastique décrit par le modèle d'Ogden est maintenant considéré. Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer la valeur de l'ordre N du modèle d'Ogden dans l'équation III-17 et la simulation de trois mousses à trois vitesses de déformation ont été réalisées avec différentes valeurs de N ($N = 1$, $N = 2$ et $N = 3$). Les résultats sont donnés par la figure III-6 et les erreurs relatives du modèle d'Ogden avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$ sont présentes par le tableau III-4.

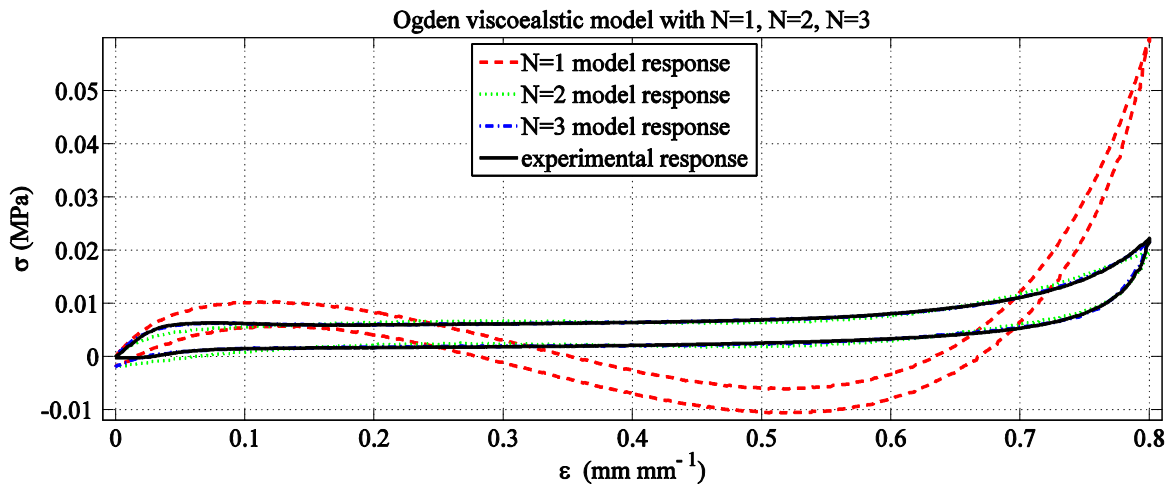


Figure III-6 Comparaison du modèle d'Ogden avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

Tableau III-4. Erreurs relatives du modèle d'Ogden avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

		Modèle d'Ogden		
		N=1	N=2	N=3
Mousse A	Test 1	148%	8.96%	2.57%
	Test 2	147%	8.92%	2.96%
	Test 3	142%	9.37%	3.14%
Mousse B	Test 1	136%	7.04%	4.74%
	Test 2	135%	6.63%	4.55%
	Test 3	133%	6.21%	3.18%
Mousse C	Test 1	80%	5.27%	2.34%
	Test 2	110%	7.02%	2.92%
	Test 3	80%	7.87%	3.33%

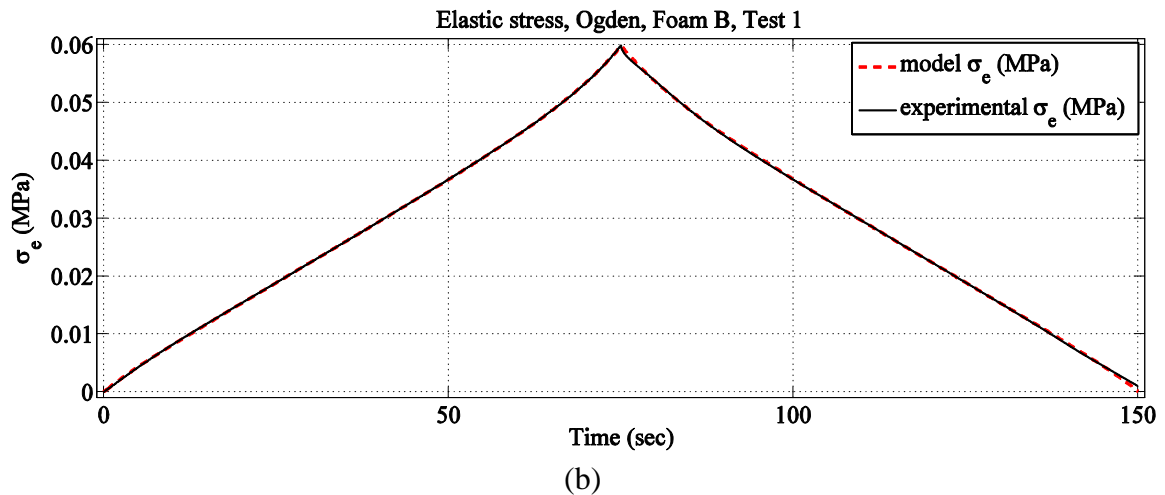
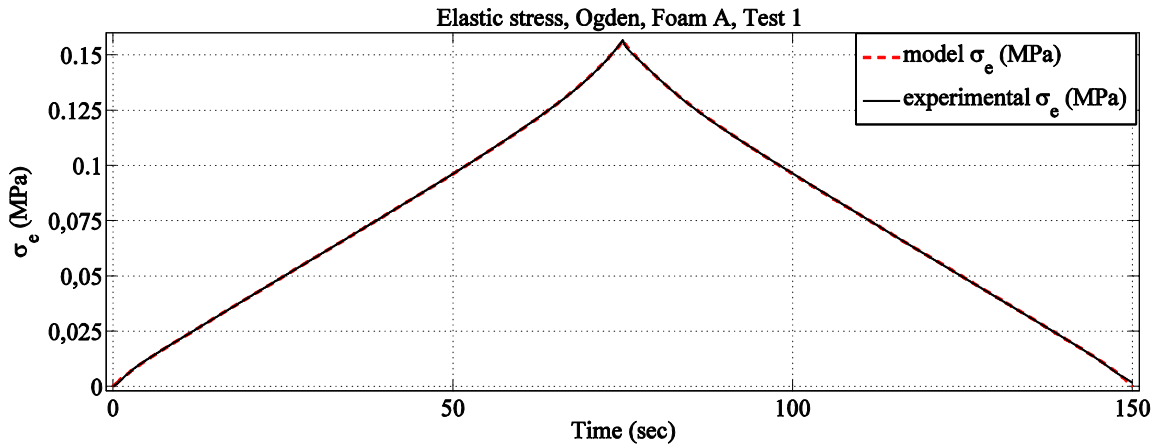
Sur la figure III-6, les résultats du modèle d'Ogden s'améliorent avec l'augmentation de valeurs de N . Les erreurs relatives de $N=1$ et 2 sont grandes, cependant, avec la valeur de $N=3$, les erreurs relatives n'ont pas dépassées 5%. Donc, selon la figure III-6 et le tableau III-4, il est évident que l'expression à trois termes du modèle hyperélastique d'Ogden est nécessaire. Les valeurs des paramètres du modèle hyperélastique d'Ogden sur trois mousses dans trois vitesses d'essais sont données dans le tableau III-5.

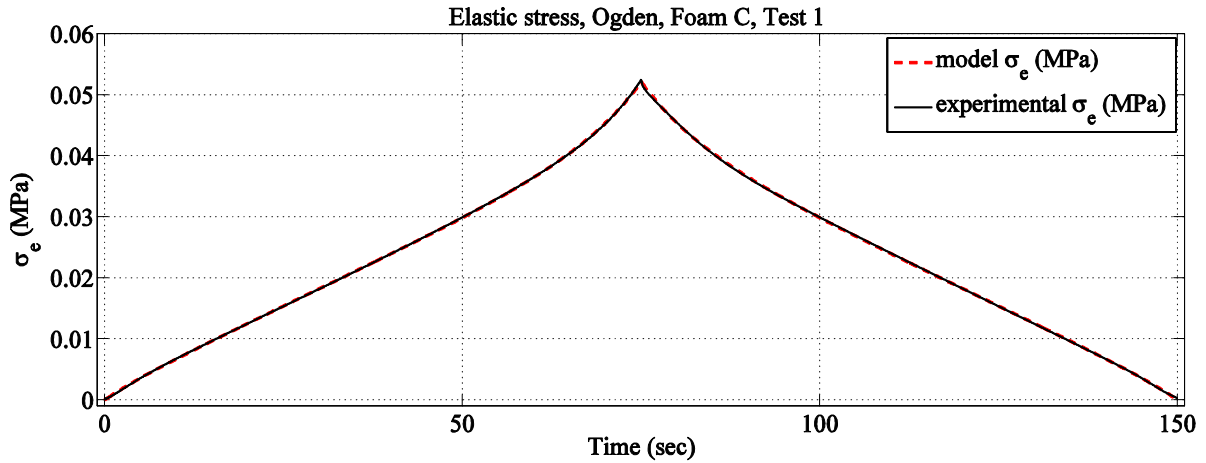
Tableau III-5. Valeurs des paramètres du modèle d'Ogden

		μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse A	Test 1	2.81	1.66	-2.798	1.61	3.1E-3	38.28
	Test 2	9.22	1.64	-9.208	1.63	2.8E-3	38.23
	Test 3	12.06	1.64	-12.05	1.63	3.0E-3	38.21
Mousse B	Test 1	9.27	1.63	-9.26	1.62	1.1E-3	23.64
	Test 2	11.66	1.61	-11.65	1.61	1.1E-3	17.74
	Test 3	7.27	1.63	-7.26	1.63	8.5E-4	45.75
Mousse C	Test 1	11.13	1.76	-11.12	1.75	9.5E-4	21.73
	Test 2	9.86	1.76	-9.85	1.76	6.9E-4	21.53
	Test 3	10.54	1.88	-10.53	1.87	2.4E-4	27.62

On constate dans le tableau III-5 que les valeurs sont différentes entre trois mousses différentes. Pour le même type de mousse, les paramètres présentent également des différences entre les trois vitesses.

La figure III-7 montre les comparaisons des contraintes hyperélastiques entre le modèle d'Ogden (en rouge) et expérimentale (en noir) pour trois mousses dans le cas du test 1. On constate la symétrie du comportement hyperélastique entre la charge et la décharge dans cette figure. Les erreurs relatives de la contrainte hyperélastique obtenues par le modèle d'Ogden sont groupées dans le tableau III-6. L'erreur relative maximale entre les résultats du modèle et expérimentale ne dépasse pas 0.4% pour tous les trois mousses sur trois vitesses.





(c)

Figure III-7 Résultats hyperélastiques du modèle d'Ogden dans le test 1
(a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C ;

Tableau III-6. Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle d'Ogden)

	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	0.14%	0.22%	0.23%	0.14%	0.12%	0.13%	0.23%	0.27%	0.38%

3.3.2.2 Modèle polynomial (Mooney-Rivlin)

Le modèle polynomial (équation III-21) est également utilisé ici pour prédire le comportement hyperélastique des trois mousses de polyuréthane sur les trois vitesses. Avec la même contrainte viscoélastique déterminée par le modèle à mémoire entière (tableau III-2), les résultats de différentes valeurs de l'ordre N du modèle polynomial viscoélastique sont donnés par la figure III-8.

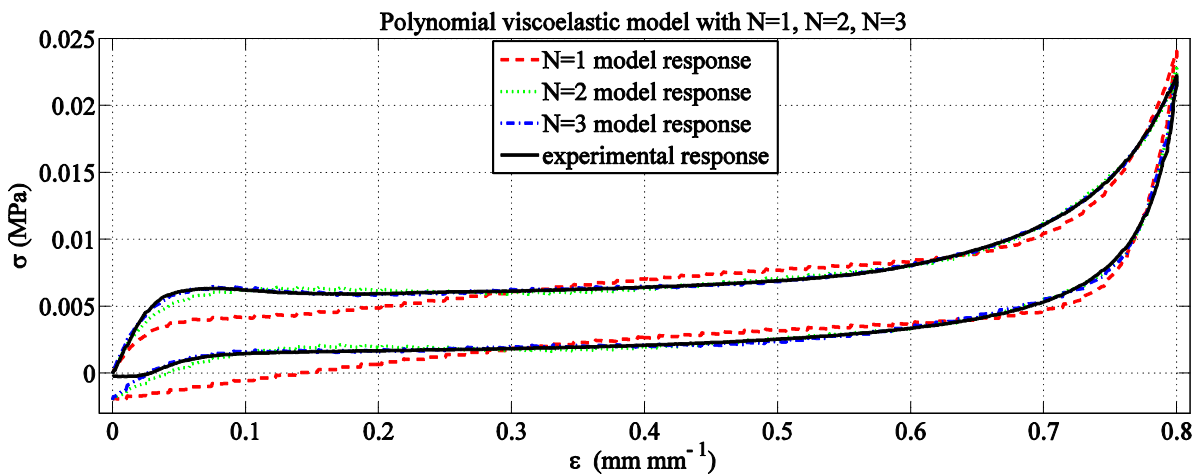


Figure III-8 Comparaison du modèle polynomial avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

Sur la figure III-8, le modèle de Mooney-Rivlin ($N = 1$) ne s'approche pas des résultats expérimentaux, ce qui signifie que ce modèle ne peut pas prédire le comportement hyperélastique pour les trois mousses de polyuréthane étudiées ici. En revanche, on peut voir sur cette figure que le modèle polynomial avec $N = 2$ et $N = 3$ présente un bon accord avec les

résultats expérimentaux. Les erreurs relatives du modèle polynomial avec $N = 1$, $N = 2$ et $N = 3$ sont données dans le tableau III-7.

Tableau III-7. Erreurs relatives du modèle de polynomial avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

		Polynomial-viscoelastic model		
		N=1	N=2	N=3
Mousse A	Test 1	15.3%	4.25%	2.85%
	Test 2	14.3%	3.64%	2.81%
	Test 3	15.5%	4.34%	3.07%
Mousse B	Test 1	12.8%	5.27%	5.22%
	Test 2	11.8%	4.89%	4.84%
	Test 3	10.6%	3.40%	3.41%
Mousse C	Test 1	9.78%	2.57%	2.54%
	Test 2	8.63%	3.01%	3.03%
	Test 3	6.58%	2.62%	2.63%

Le tableau III-7 permet de constater que les erreurs du modèle polynomial avec $N = 1$ (Modèle de Mooney-Rivlin) sont plus élevées que ceux de l'ordre de $N = 2$ et $N = 3$. On peut aussi voir dans le tableau III-7 que les erreurs entre les ordres $N = 2$ et $N = 3$ ne présentent pas une grande différence. Cependant, la forme $N = 3$ a plus de paramètres (12 paramètres, voir équation III-25) que la forme $N = 2$ (7 paramètres, voir équation III-24). Considérant le nombre de paramètres et la précision des résultats de la simulation, le modèle polynomial avec l'ordre $N = 2$ est un meilleur compromis et les valeurs des paramètres de modèle estimés à partir de l'essai de compression/décompression, selon la procédure décrite dans la section, sont présentées dans le tableau III-8.

Tableau III-8. Paramètres du modèle polynomial

		C10	C01	C11	C20	C02	D1	D2
Mousse A	Test 1	-2.02	1.22	-0.038	-0.221	0.0056	1.182	0.251
	Test 2	-1.44	0.863	-0.029	-0.151	0.0042	0.879	0.205
	Test 3	-1.83	1.11	-0.034	-0.199	0.0051	1.069	0.232
Mousse B	Test 1	-0.289	0.168	-0.0069	-0.026	9.97E-4	0.203	0.054
	Test 2	-0.233	0.134	-0.0057	-0.021	8.25E-4	0.168	0.045
	Test 3	-0.051	0.029	-0.0026	-0.0012	3.64E-4	0.069	0.023
Mousse C	Test 1	-0.265	0.153	-6.4E-3	-0.023	9.21E-4	0.184	0.052
	Test 2	-0.151	0.083	-4.6E-3	-0.011	6.54E-4	0.131	0.041
	Test 3	-0.071	0.036	-2.6E-3	-0.028	3.72E-4	0.076	0.026

La figure III-9 montre que les résultats hyperélastique du modèle polynomial sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le tableau III-9 présente les erreurs relatives de la contrainte hyperélastique obtenues par le modèle polynomial.

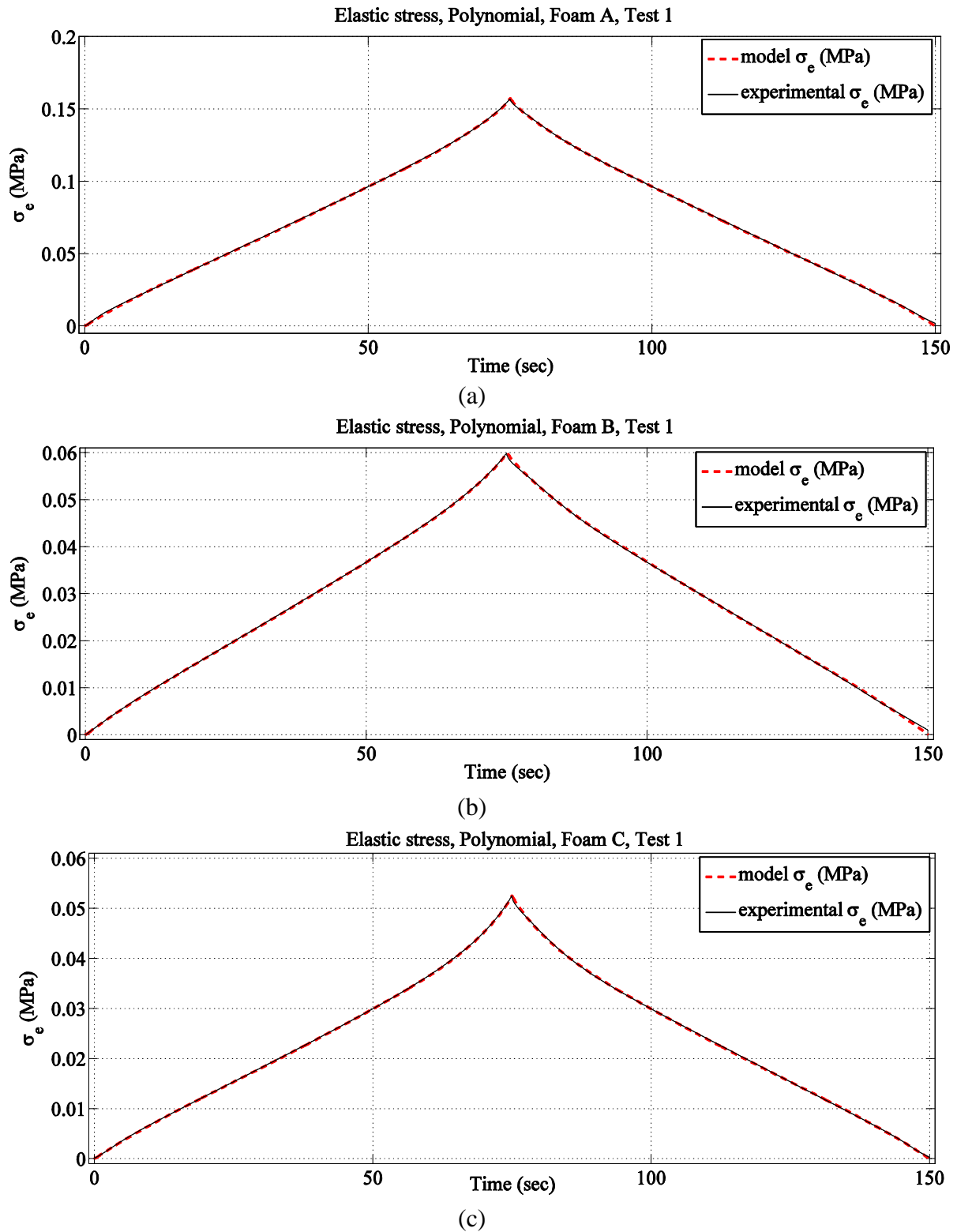


Figure III-9 Résultats hyperélastiques du modèle polynomial dans le test 1
(a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C ;

Tableau III-9. Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle polynomial)

	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	0.22%	0.21%	0.25%	0.10%	0.11%	0.08%	0.13%	0.13%	0.12%

3.3.2.3 Modèle polynomial réduit (neo-Hookeéen)

Le modèle polynomial réduit est considéré ici pour simuler les comportements hyperélastiques de trois mousses de polyuréthane. Grâce à une procédure d'identification similaire à celle utilisée pour les modèles d'Ogden et polynomial, les résultats globaux pour différents ordres N de ce modèle sont présentés dans la figure III-10.

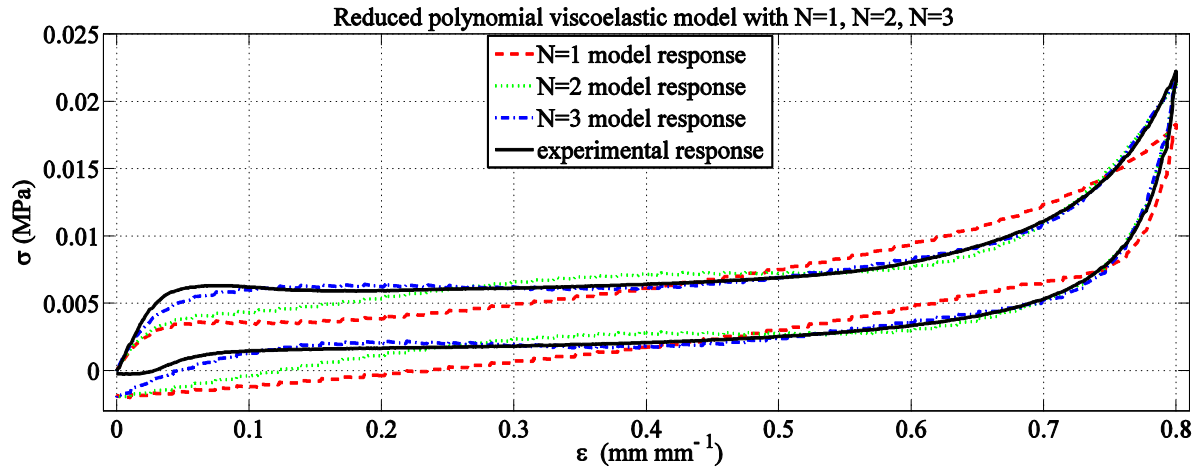


Figure III-10 Comparaison du modèle polynomial réduit avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

Sur la figure III-10, le modèle neo-Hookeéen ($N = 1$) n'est pas en accord avec les courbes expérimentales. De même pour l'ordre $N = 2$, les résultats du modèle ne donnent pas un résultat acceptable. Par contre, le modèle d'ordre $N = 3$ est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Le tableau III-10 permet de confirmer que l'ordre de $N = 3$ est nécessaire pour la prédiction du comportement hyperélastique des mousses de polyuréthane avec le modèle polynomial réduit.

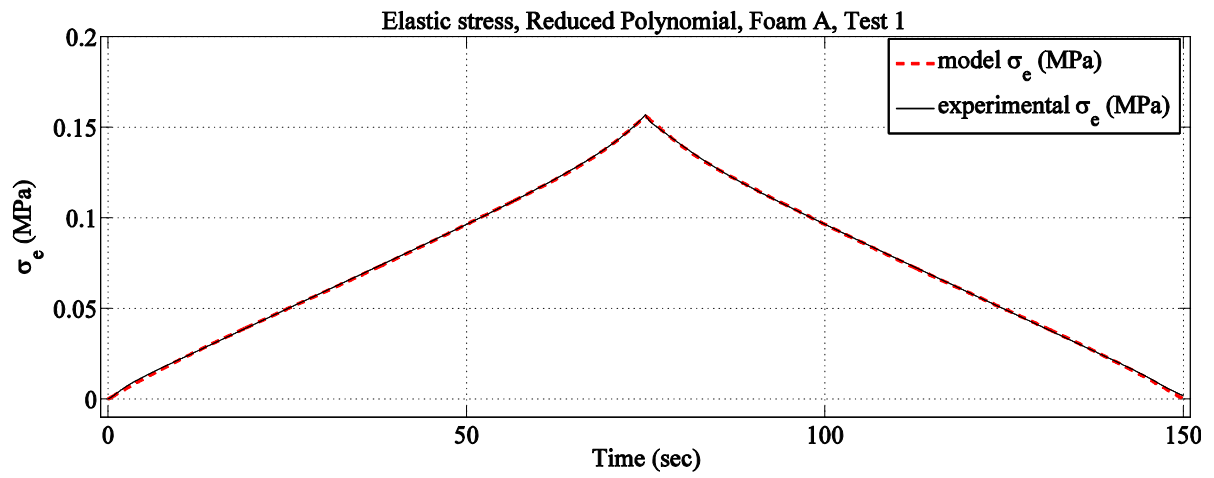
Tableau III-10. Erreurs relatives du modèle de polynomial réduit avec $N=1$, $N=2$ et $N=3$

		Reduced polynomial model		
		$N=1$	$N=2$	$N=3$
Mousse A	Test 1	23.0%	12.9%	5.33%
	Test 2	22.5%	12.4%	4.64%
	Test 3	23.9%	13.4%	5.38%
Mousse B	Test 1	18.6%	10.0%	5.69%
	Test 2	17.1%	9.17%	5.26%
	Test 3	17.4%	7.66%	3.62%
Mousse C	Test 1	16.8%	7.39%	3.01%
	Test 2	16.9%	6.56%	3.26%
	Test 3	16.1%	5.13%	2.76%

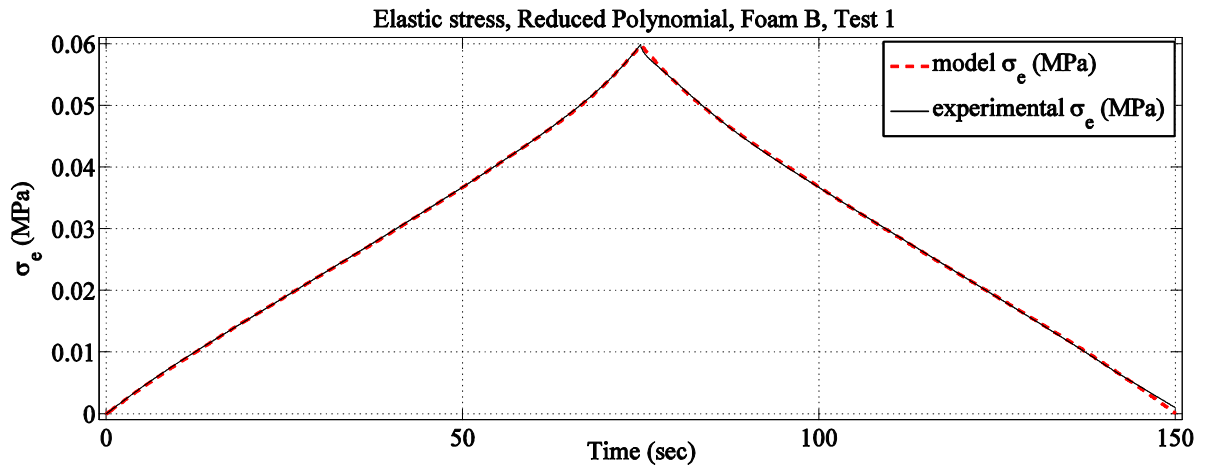
Les valeurs des paramètres hyperélastiques du modèle polynomial réduit sont données dans le tableau III-11. Avec ces valeurs, les comparaisons hyperélastiques entre les courbes du modèle et les courbes expérimentales sont présentées sur la figure III-11.

Tableau III-11. Valeurs des paramètres hyperélastiques du modèle polynomial réduit

		C10	C20	C30	D1	D2	D3
Mousse A	Test 1	-0.068	0.0099	-6.58E-4	0.202	0.127	0.038
	Test 2	-0.062	0.0088	-5.69E-4	0.187	0.114	0.038
	Test 3	-0.064	0.0093	-6.07E-4	0.185	0.119	0.037
Mousse B	Test 1	-0.019	0.0028	-1.84E-4	0.067	0.035	0.013
	Test 2	-0.016	0.0024	-1.55E-4	0.059	0.029	0.011
	Test 3	-0.011	0.0015	-9.90E-5	0.043	0.018	0.009
Mousse C	Test 1	-0.019	0.0028	-1.83E-4	0.059	0.034	0.012
	Test 2	-0.016	0.0023	-1.49E-4	0.061	0.029	0.012
	Test 3	-0.011	0.0016	-1.01E-4	0.045	0.020	0.008



(a)



(b)

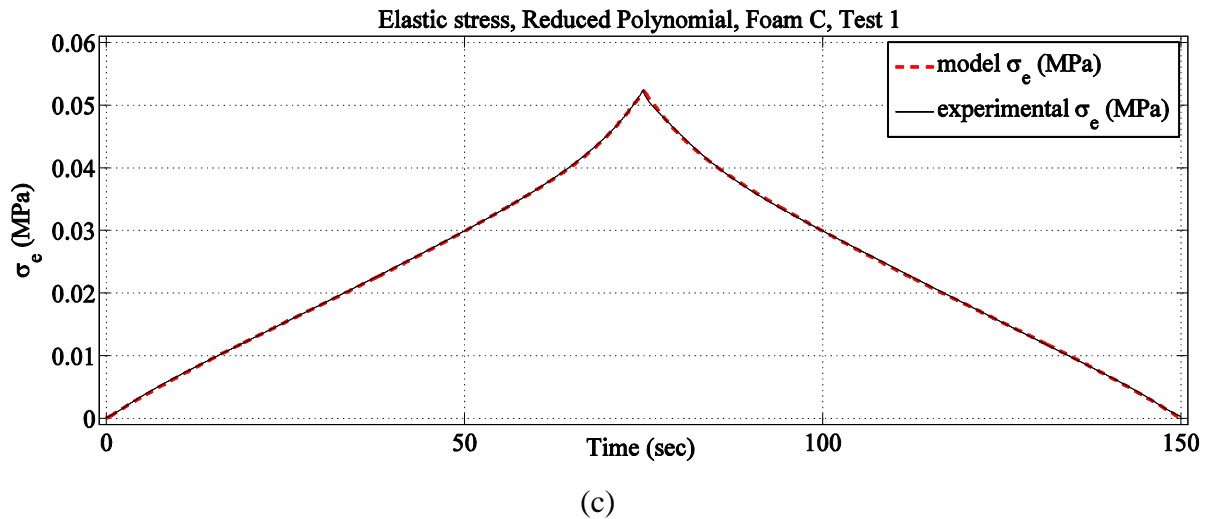


Figure III-11 Résultats hyperélastiques du modèle polynomial réduit dans le test 1
(a) mousse A ; (b) mousse B ; (c) mousse C ;

Dans la figure III-11, les courbes obtenues par le modèle polynomial réduit (en rouge) présentent une bonne concordance avec les courbes expérimentales (en noir). Les erreurs relatives du modèle polynomial réduit sont groupées dans le tableau III-12.

Tableau III-12. Erreurs relatives de l'hyperélasticité (modèle polynomial réduit)

	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	0.22%	0.20%	0.26%	0.16%	0.16%	0.11%	0.19%	0.16%	0.14%

3.3.2.4 Modèles globaux

Dans la partie 3.3.2, nous avons présenté les trois modèles hyperélastiques qui sont utilisés ici pour la modélisation du comportement hyperélastiques de la mousse de polyuréthane. Les résultats viscoélastiques obtenus par le modèle à mémoire entier sont déjà présentés dans la section 3.3.1. Selon l'équation III-1, les modèles globaux sont la combinaison du modèle viscoélastique et du modèle hyperélastique, qui seront appelé le modèle visco-hyperélastique d'Ogden, le modèle visco-hyperélastique polynomial et le modèle visco-hyperélastique polynomial réduit. Les résultats globaux avec ces trois modèles seront présentés dans la partie suivante.

3.3.3 Résultats globaux

3.3.3.1 Modèle visco-hyperélastique d'Ogden

La combinaison du modèle à mémoire entier (représente la partie viscoélastique) et du modèle d'Ogden (représente la partie viscoélastique) sera appelé ici le modèle visco-hyperélastique d'Ogden. Par rapport les résultats viscoélastiques (tableau III-2, figure III-5) et les résultats hyperélastiques du modèle d'Ogden (tableau III-5, figure III-7), les courbes globales de contrainte-déformation du modèle visco-hyperélastique d'Ogden sont présentés par la figure III-12. Il montre que les résultats du modèle sont en accord avec les résultats expérimentaux pour les trois mousses différentes dans le test 1.

La réponse du modèle se situe bien entre les enveloppes expérimentales maximum et minimum. Les résultats du test 2 et 3 ne sont pas présentés ici, car ils sont similaires avec le test 1. Les erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique d'Ogden sont groupées dans le tableau III-13.

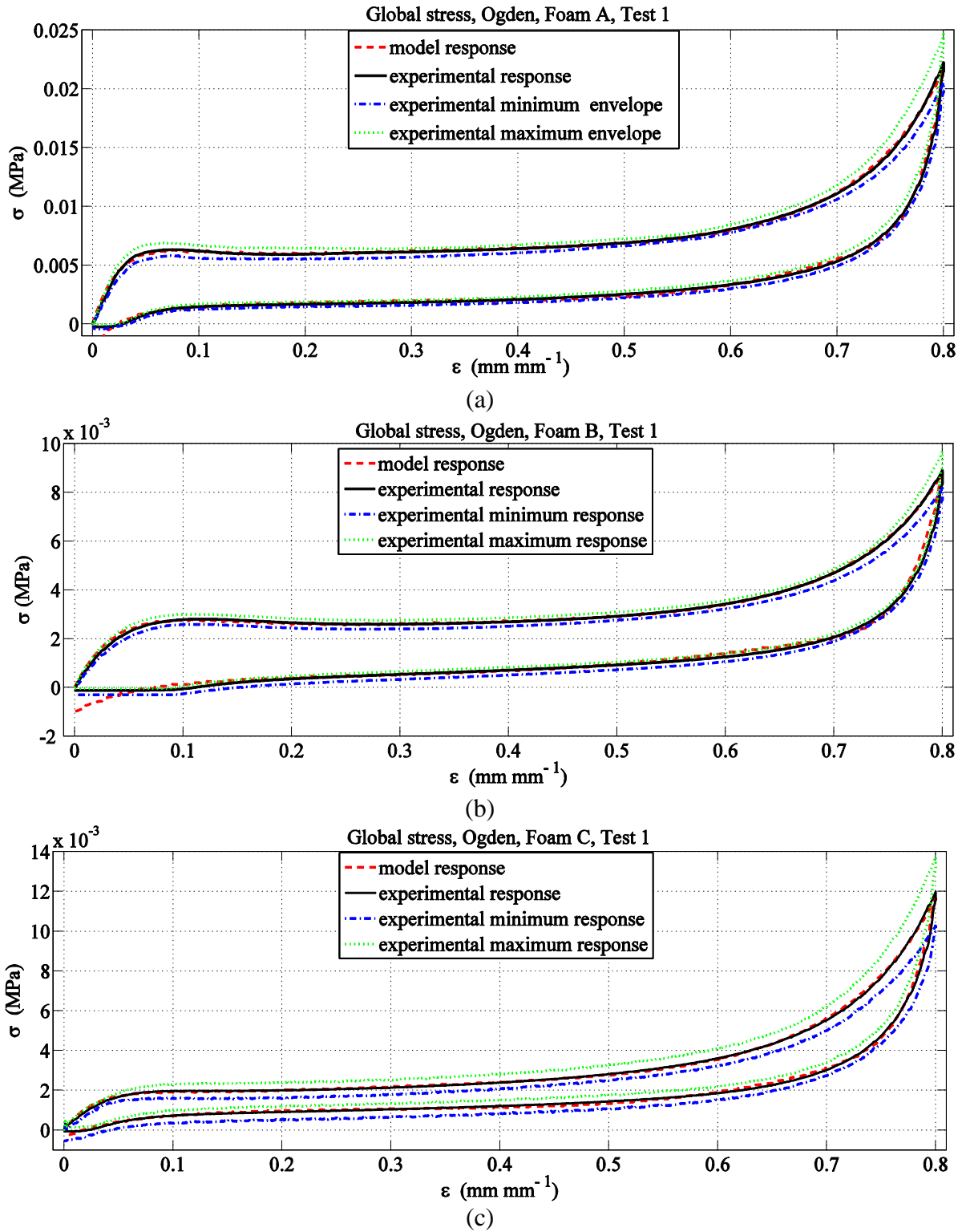


Figure III-12. Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique d'Ogden dans le test 1.
(a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C.

Tableau III-13. Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique d'Ogden

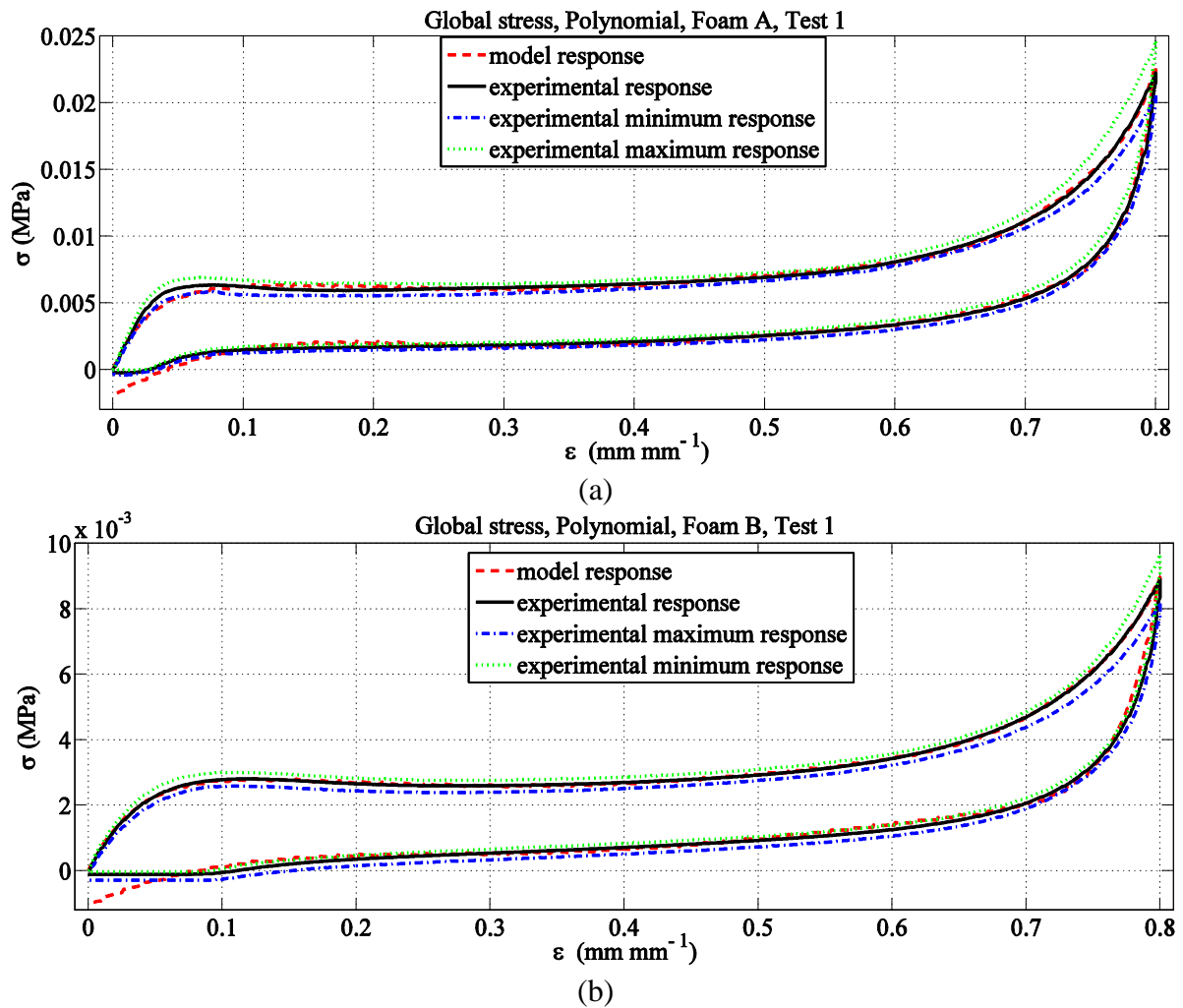
	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	2.57%	2.96%	3.14%	4.74%	4.55%	3.18%	2.34%	2.92%	3.33%

Comme le montre dans la figure III-12 et le tableau III-13, nous avons constaté que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden peut prévoir bien le comportement mécanique de la mousse de polyuréthane pendant les essais compression/décompression unidirectionnelles.

3.3.3.2 Modèle visco-hyperélastique polynomial

Comme la définition du modèle visco-hyperélastique d'Ogden, le modèle visco-hyperélastique polynomial se compose le modèle à mémoire entier (viscoélastique) et le modèle polynomial (hyperélastique).

La Figure III-13 présente la comparaison entre les résultats du modèle visco-hyperélastique polynomial et les résultats expérimentaux.



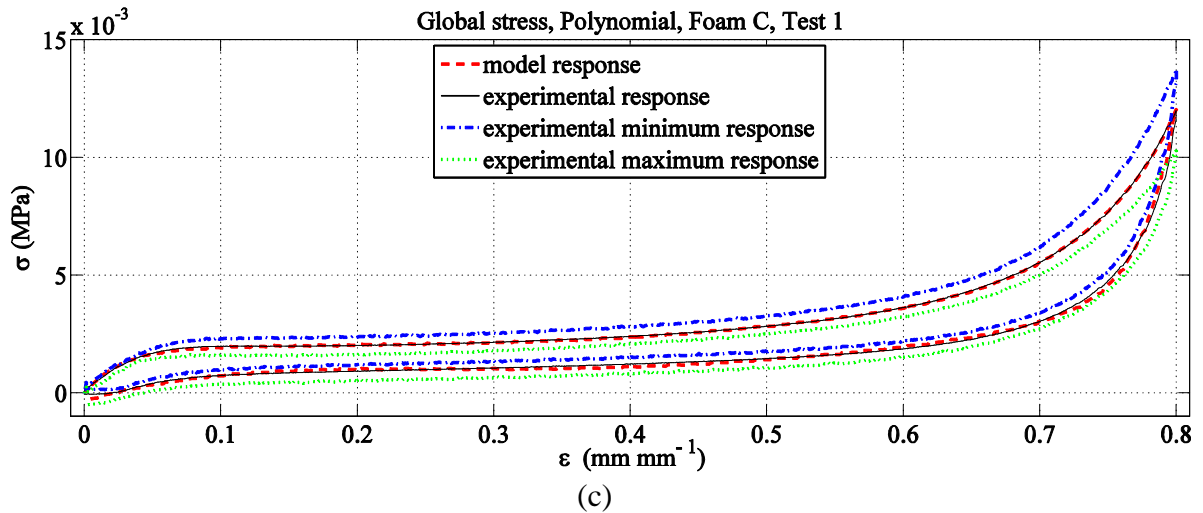


Figure III-13. Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique polynomial dans le test 1.

(a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C.

On peut voir que les courbes de réponse du modèle présentent un bon accord avec les courbes expérimentales et se situent entre les courbes enveloppes expérimentaux maximale et minimale. Les résultats obtenus par le modèle visco-hyperélastique polynomial des tests 1 et 2 sont donnés par l'annexe.

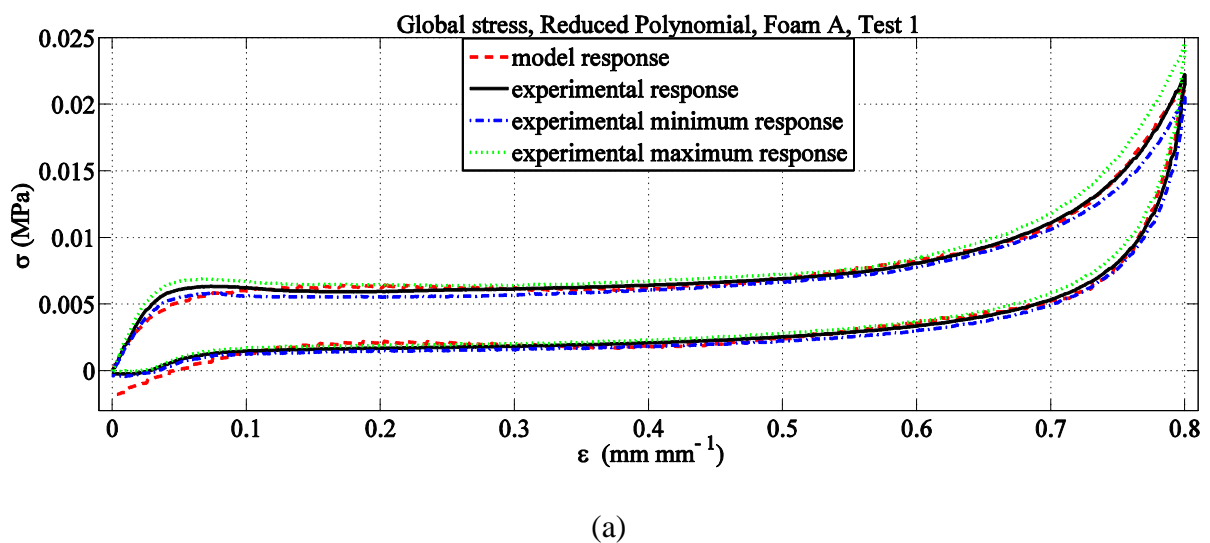
Le tableau III-14 présente les erreurs relatives globales de ce modèle et la valeur maximale ne dépasse pas 6%.

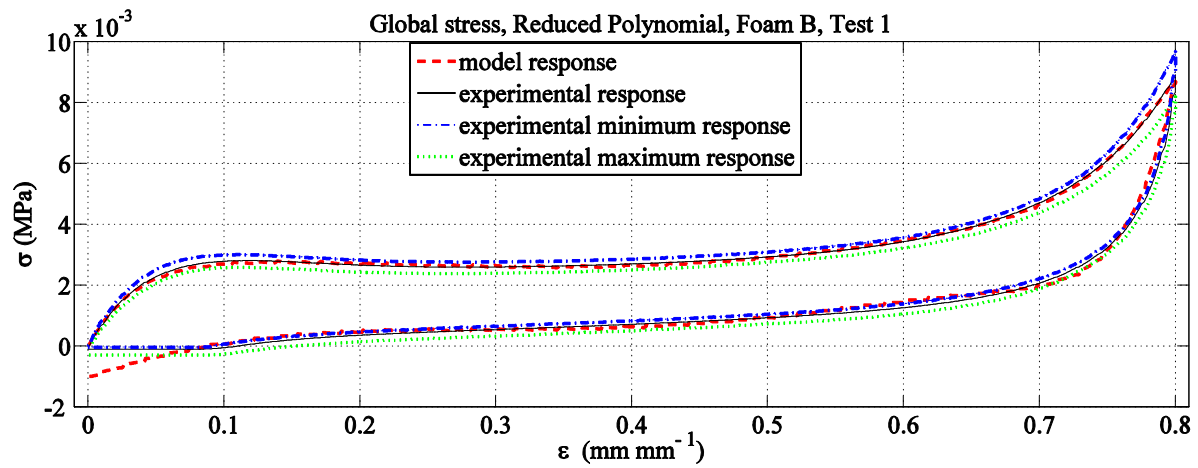
Tableau III-14. Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique polynomial

	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	4.25%	3.64%	4.34%	5.27%	4.89%	3.40%	2.57%	3.01%	2.62%

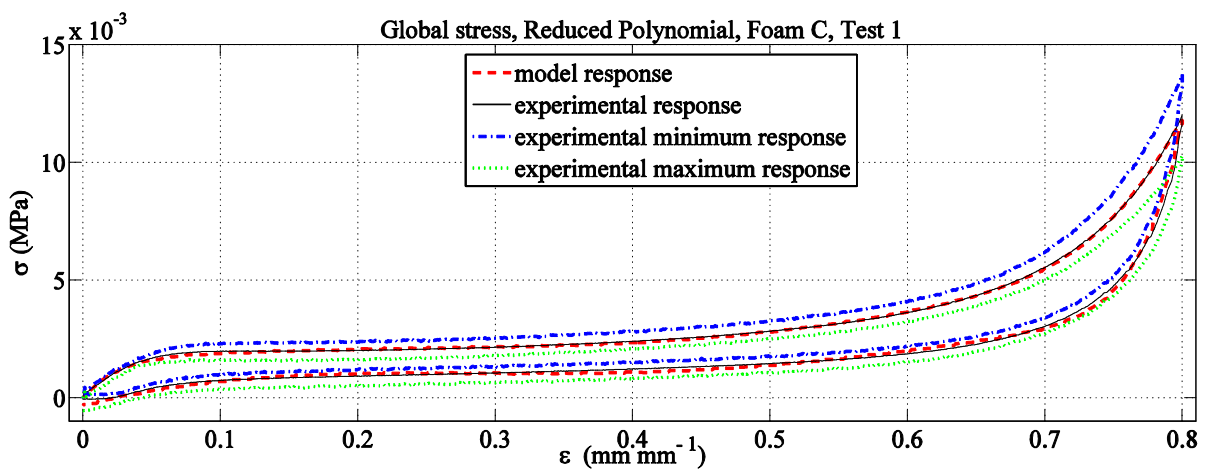
3.3.3.3 Modèle visco-hyperélastique polynomial réduit

Comme le modèle visco-hyperélastique d'Ogden et visco-hyperélastique polynomial, les résultats du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit sont également présentés ici.





(b)



(c)

Figure III-14. Résultats globaux du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit dans le test 1. (a) Mousse A ; (b) Mousse B ; (c) Mousse C.

Figure III-14 montre que les résultats globaux du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit avec l'ordre $N=3$ sont entre le minimum et le maximum des enveloppes expérimentales. Les erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit sont groupées dans le tableau III-15.

Tableau III-15. Erreurs relatives globales du modèle visco-hyperélastique polynomial réduite

	Mousse A			Mousse B			Mousse C		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
erreur	5.33%	4.64%	5.38%	5.69%	5.26%	3.62%	3.01%	3.26%	2.76%

3.4 Comparaisons entre les résultats obtenues sur trois mousses par les trois vitesses

3.4.1 Comparaison des 3 modèles

Les trois modèles globales, à savoir le modèle visco-hyperélastique d'Ogden, le modèle visco-hyperélastique polynomial et le modèle visco-hyperélastique polynomial réduit, sont utilisés pour la modélisation du comportement mécanique de la mousse de polyuréthane pendant les essais compression/décompression. Selon la figure III-12, on montre que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden est en accord avec les résultats expérimentaux, en particulier dans la partie de compression élevée.

Selon la figure III-8, les résultats du modèle visco-hyperélastique polynomial avec l'ordre $N=2$ et $N=3$ sont en accord avec les données expérimentales. Dans le tableau III-7, les erreurs du modèle polynomial viscoélastique pour la forme $N=2$ et la forme $N=3$ ne présentent pas une grande différence. Par contre, la forme $N=3$ a plus de paramètres que la forme $N=2$, pour cette raison, la forme $N=2$ du modèle polynomial a été choisie dans la présente étude pour prédire le comportement hyperélastique de la mousse de polyuréthane. Pour le modèle polynomial réduit, nous avons choisi $N=3$ au vu des résultats du tableau III-10.

Tableau III-16. Erreurs relatives des modèles visco-hyperélastiques

		Visco-hyperélastique d'Ogden	Visco-hyperélastique polynomial	Visco-hyperélastique polynomial réduit
Number of parameters		6+8	7+8	6+8
Foam A	Test 1	2.57%	4.25%	5.33%
	Test 2	2.96%	3.64%	4.64%
	Test 3	3.14%	4.34%	5.38%
Foam B	Test 1	4.74%	5.27%	5.69%
	Test 2	4.55%	4.89%	5.26%
	Test 3	3.18%	3.40%	3.62%
Foam C	Test 1	2.34%	2.57%	3.01%
	Test 2	2.92%	3.01%	3.26%
	Test 3	3.33%	2.62%	2.76%

En comparant le nombre des paramètres des trois modèles, ainsi que les erreurs entre les résultats des modèles et les résultats expérimentaux dans le tableau III-16, le modèle visco-hyperélastique d'Ogden à l'ordre $N=3$ a le moins de paramètres (6 paramètres hyperélastiques + 8 paramètres viscoélastiques) et des erreurs moyennes minimales. Ainsi, le modèle visco-hyperélastique d'Ogden offre un meilleur compromis que les deux autres modèles. Dans le tableau III-16, on constate ainsi que les erreurs du modèle visco-hyperélastique polynomial ($N=3$) sont plus petites que celles du modèle visco-hyperélastique polynomial réduit ($N=3$), son nombre de paramètres est plus important. En conclusion, après avoir comparé les trois modèles, le modèle visco-hyperélastique d'Ogden est choisi ici pour la modélisation de l'Effet de Mullins de la mousse de polyuréthane et nous allons le présenter dans le chapitre suivant.

3.4.2 Comparaison des 3 mousses

Nous avons choisi trois types différents de mousse (mousse A, mousse B et mousse C) de polyuréthane pour les études de leur comportement mécanique. La figure III-15 montre que les résultats du modèle à mémoire entière en utilisant la méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Elle montre également que les trois mousses présentent des comportements viscoélastiques très différents. On constate également que la mousse A présente une différence de contrainte donc de composante viscoélastique plus élevée que les mousses B et C. Par contre, la mousse B et C ne présentent pas une grande différence de contrainte dans la zone de 60 à 75 secondes, soit sur la fin de la décharge.

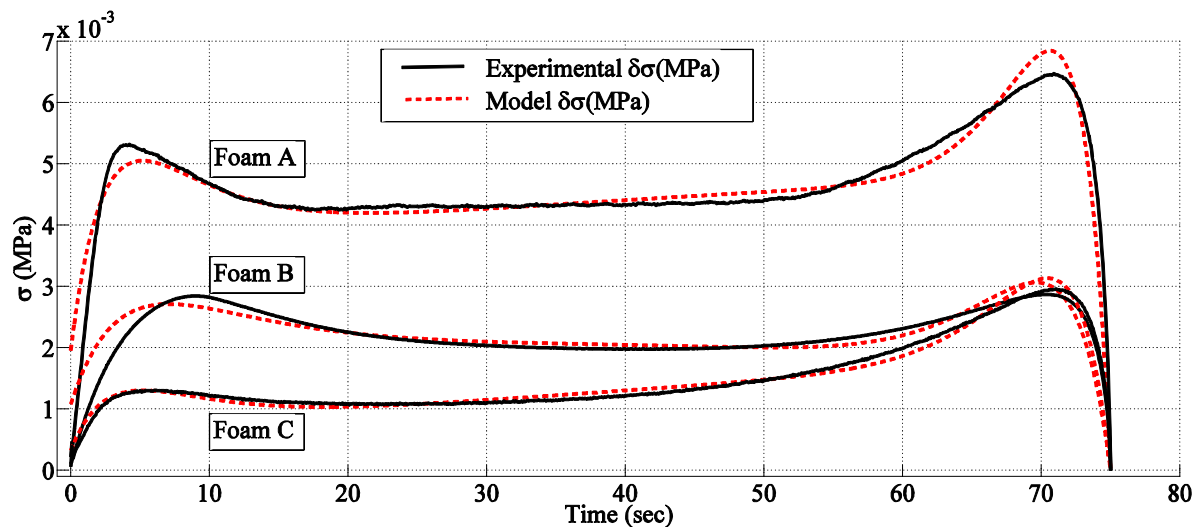


Figure III-15. Différence de contrainte entre la charge et la décharge (mousse A, B et C ; test 1)

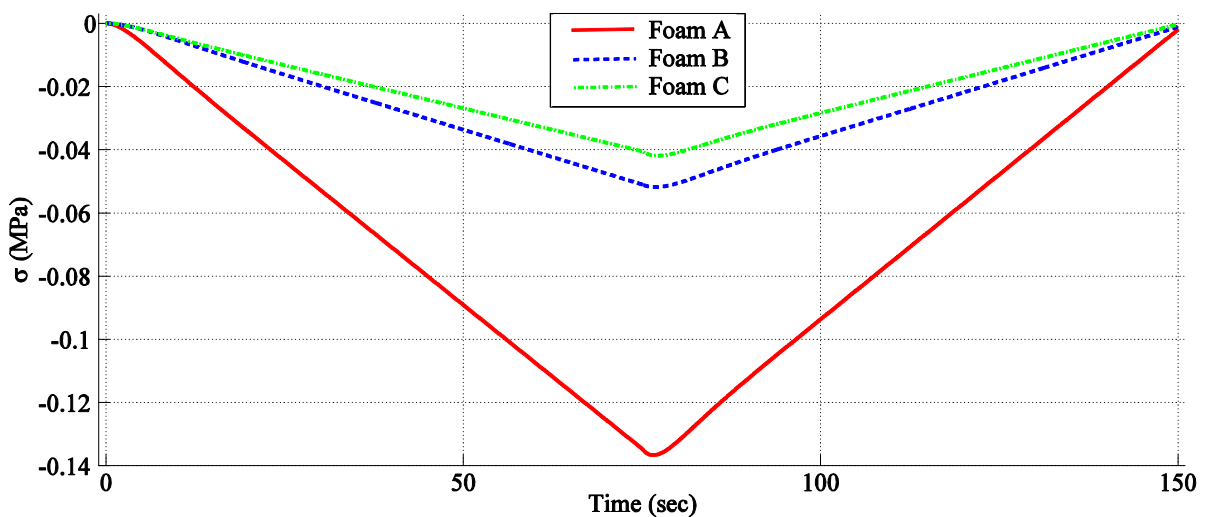


Figure III-16. Contrainte viscoélastique des trois mousses dans le test 1.

Les résultats des contraintes viscoélastiques pour les trois mousses dans le test 1 sont donnés par la figure III-16. On peut voir à partir de ces comparaisons que la mousse A a la contrainte viscoélastique la plus élevée des trois mousses et la contrainte viscoélastique de la mousse B

est supérieure à celle de la mousse C. Cela montre que la contrainte viscoélastique suit une orientation inverse à la contrainte globale. Ceci décrit l'effet de relaxation sur le comportement global de mousses.

La comparaison de la contrainte hyperélastique des trois mousses est donnée par le modèle hyperélastique d'Ogden. Dans la figure III-17, la mousse A a une contrainte hyperélastique plus élevée que celle de la mousse B et C. La mousse B a une contrainte hyperélastique un peu de élevée que la mousse C. Ainsi on peut conclure que le modèle viscoélastique d'Ogden proposé dans notre travail ici peut être utilisé pour prédire le comportement mécanique des différents types de mousses de polyuréthane avec des densités différentes.

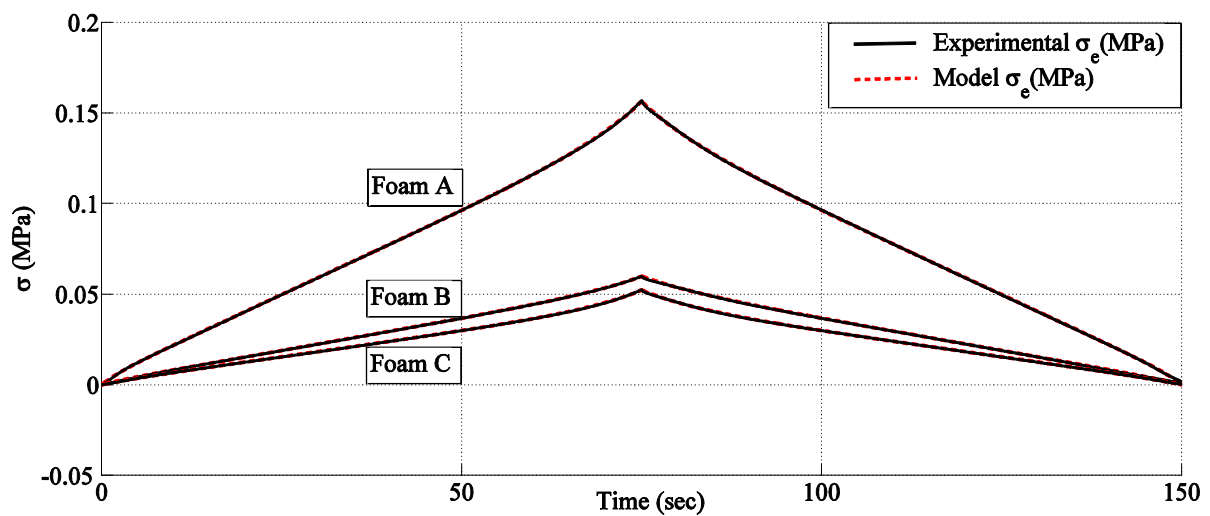


Figure III-17. Contrainte hyperélastique du modèle d'Ogden des trois mousses dans le test 1.

3.5 Conclusion du chapitre III

Dans ce chapitre, 3 modèles visco-hyperélastiques ont été proposés pour la description du comportement mécanique de la mousse de polyuréthane. La méthode de différence de contrainte qui suppose la symétrie du comportement hyperélastique entre la charge et la décharge a été utilisée pour identifier les paramètres viscoélastiques du modèle à mémoire entier. Ce modèle a permis donc de prédire le comportement viscoélastique de nos mousses. Les résultats du modèle à mémoire sont en accord avec les résultats expérimentaux.

Afin de prédire le comportement hyperélastique, trois modèles hyperélastiques, à savoir le modèle d'Ogden, le modèle polynomial et le modèle polynomial réduit, généralement établis pour les matériaux compressibles, ont été utilisés. Les résultats montrent que le modèle Mooney-Rivlin et Neo-Hookeen n'est pas adaptable pour la prédiction du comportement hyperélastique de la mousse, par contre, le modèle d'Ogden avec une expression à trois termes, le modèle polynomial avec $N=2$ et le modèle polynomial réduit viscoélastique avec $N=3$ peuvent prédire le comportement hyperélastique des mousses de polyuréthane, même dans des grandes déformations.

Grâce à le modèle à mémoire entier et les modèles hyperélastiques, les résultats globaux sont également présentés dans ce chapitre. Les erreurs entre le modèle et les données expérimentales ont été présentées. Les résultats montrent que parmi les trois modèles, le modèle hyper-viscoélastique d'Ogden fournit le meilleur compromis entre les erreurs et le nombre de paramètres. Il nous permet de choisir ce modèle pour modéliser le comportement de l'effet de Mullins dans le chapitre 4.

Enfin, les comparaisons entre les trois types différentes sont comparées avec le modèle visco-hyperélastique d'Ogden. Les résultats montrent que la mousse A a une contrainte hyperélastique à la fois une contrainte viscoélastique plus élevée que celle de la mousse B et C. Par contre, la mousse B et C ne présentent pas une grande différence de contrainte.

Chapitre IV: Modélisation de l'effet de Mullins

4.1 Introduction

Les essais multicycles présentés au chapitre 2 ont montré que la mousse de polyuréthane présente un comportement similaire à celui du caoutchouc sous compressions cycliques, ce qui est connu sous le nom effet de Mullins. L'effet de Mullins a été décrit par Mullins et ses collègues en 1948 [MUL48]. Aussi connu comme sous le nom de ramollissement de Mullins, l'effet de Mullins est un effet d'endommagement généralement utilisé pour décrire la réponse mécanique des caoutchoucs sous chargements cycliques. Il se caractérise par une diminution de la contrainte pour la même déformation à chaque cycle de rechargement, comme le montre la figure IV-1. De plus, cet effet est plus important entre le 1^{er} cycle et les cycles suivants.

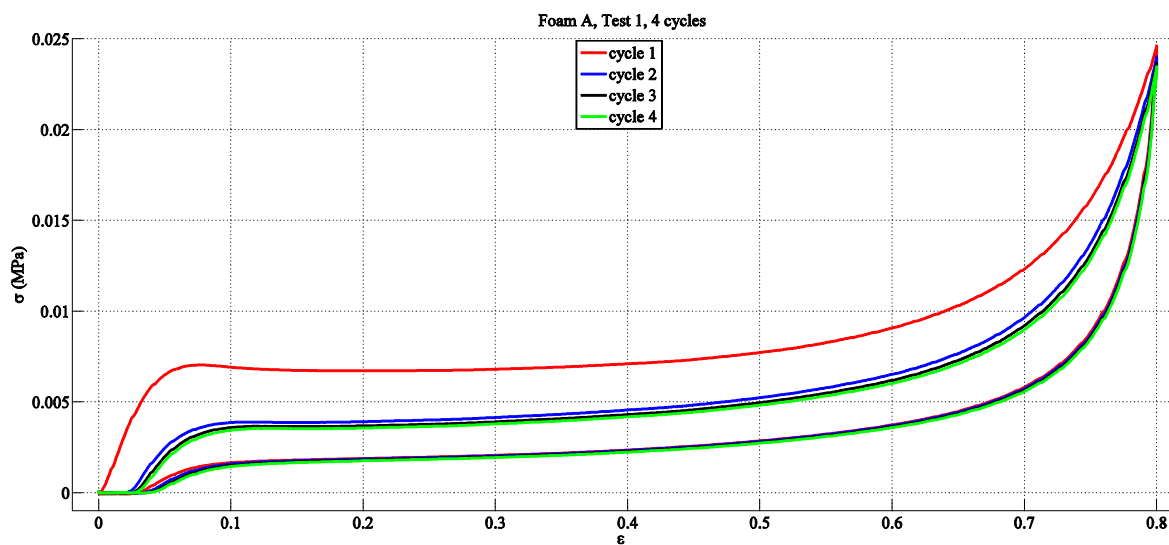


Figure IV-1 Effet de Mullins

Les chercheurs ont proposé plusieurs interprétations physiques de l'effet de Mullins. D'un point de vue micro-mécanique, la rupture de chaînes à l'interface, le glissement des molécules, la rupture des agrégats de charges peuvent apporter des éléments pour expliquer ce phénomène [OGD99]. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter la modélisation de l'effet de Mullins de la mousse de polyuréthane lors d'essais de compression/décompression. Par rapport au modèle viscoélastique initial, celui-ci a été modifié de façon à avoir des paramètres différents entre le premier cycle et les cycles suivants. C'est-à-dire que le modèle à mémoire entier sera également utilisé pour la modélisation du comportement viscoélastique pour les 4 cycles. Selon les comparaisons entre les trois modèles hyperélastiques du chapitre 3, le modèle d'Ogden sera utilisé ici pour modéliser le comportement hyperélastique de la mousse de polyuréthane pendant 4 cycles. Puis, les résultats de l'identification sur les trois mousses avec trois vitesses pendant 4 cycles seront présentés. Les résultats viscoélastiques et les résultats hyperélastiques de la mousse A pour les trois vitesses lors des 4 cycles seront détaillés. Ainsi, nous donnerons également les résultats des mousses B et C dans le cas du test 1. Enfin, nous présenterons une analyse détaillée des résultats et nous montrerons les comparaisons entre les trois mousses avec trois vitesses sur les quatre cycles.

4.2 Modélisation de l'effet de Mullins

Nous avons montré dans le chapitre 3 que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden est le modèle le plus approprié pour simuler le comportement mécanique de la mousse. Ce modèle global est constitué d'une partie viscoélastique et d'une partie hyperélastique avec l'expression suivante :

$$\sigma = \underbrace{\int_0^t \sum_{l=1}^L a_l e^{-\beta_l(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau}_{\text{viscoelastic}} + \underbrace{\lambda^{-1} \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - 1)}_{\text{hyperelastic}} \quad (\text{IV-1})$$

Dans le chapitre 3, nous avons présenté ce modèle avec des paramètres viscoélastiques différents entre les phases de charge et de décharge, une valeur de L égale à deux et une valeur de N égale à trois. Dans cette partie du travail, précisons également que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden présente des paramètres différents entre le premier cycle et les cycles suivants, c'est-à-dire que nous avons utilisé des paramètres viscoélastiques et des paramètres hyperélastiques différents pour chaque cycle.

4.2.1 Expression du modèle viscoélastique pour 4 cycles

Nous avons présenté les résultats du 1^{er} cycle pour trois mousses (mousse A, B, et C) à trois vitesses dans le chapitre 3. Les trois mêmes types de mousses avec les échantillons différents sont utilisés dans ce chapitre pour étudier le comportement viscoélastique sur 4 cycles. Rappelons que la modélisation du comportement viscoélastique pour le cycle 1 avec le modèle à mémoire est de la forme suivante :

$$\sigma(t) = \int_0^t \sum_{l=1}^L a_l e^{-\beta_l(t-\tau)} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{IV-2})$$

La méthode d'identification de la différence de contrainte entre la charge et la décharge est aussi utilisée ici pour prévoir le comportement viscoélastique des différents cycles.

- 1^{er} cycle

Les équations pour le cycle 1 sont les suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_v^{1,L}(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \sigma_v^{1,UL}(t) = \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (\text{IV-3})$$

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 3, les vitesses de déformation pour chaque essai sont constantes pendant le processus de chargement et de déchargement dans l'essai de compression/décompression unidirectionnelle. Ainsi, la relation entre la déformation et le

temps est linéaire et la courbe déformation-temps pour le cycle 1 peut être obtenue par la figure IV-2.

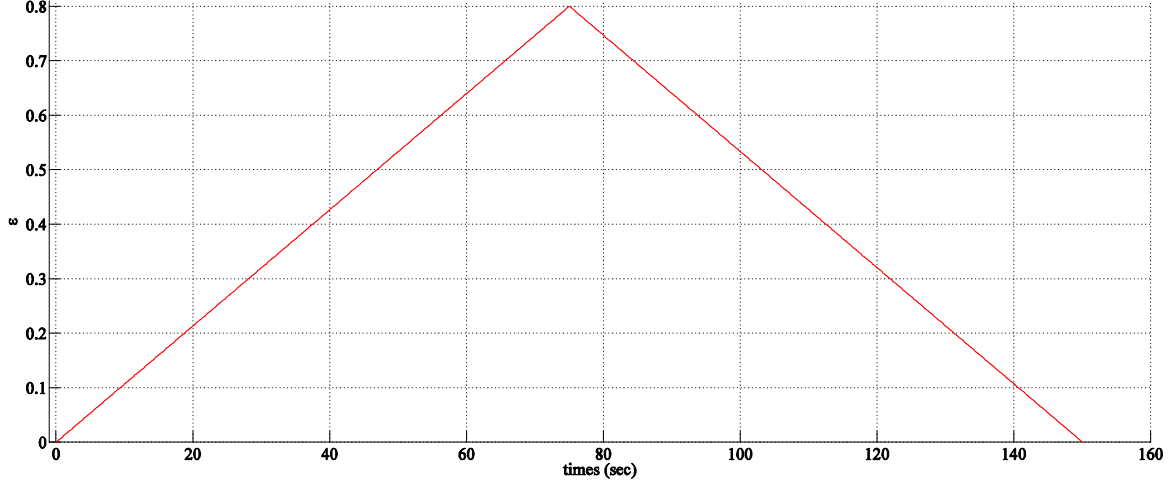


Figure IV-2 Courbe déformation-temps pour le cycle 1

Dans la figure IV-2, l'expression de la relation entre le temps et la déformation dans la phase de chargement $\varepsilon^{1,L}(t)$ et de déchargement $\varepsilon^{1,UL}(t)$ peut être définie comme:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{1,L}(\tau) &= \frac{2\varepsilon_{\max}}{T} \tau & \left(0 \leq \tau \leq \frac{T}{2}\right) \\ \varepsilon^{1,UL}(\tau) &= -\frac{2\varepsilon_{\max}}{T} \tau + 2\varepsilon_{\max} & \left(\frac{T}{2} \leq \tau \leq T\right) \end{aligned} \quad (IV-4)$$

Voyons maintenant, les expressions pour les cycles suivants.

- 2^{ème} cycle

Avec le modèle à mémoire pour le comportement viscoélastique, les équations sont suivantes pour le cycle 2 :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_v^{2,L}(t) &= \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\ &\quad \int_T^t \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau & T \leq t \leq \frac{3T}{2} \\ \sigma_v^{2,UL}(t) &= \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\ &\quad \int_T^{\frac{3T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{3T}{2}}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{2,UL} e^{-\beta_i^{2,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{2,UL}(\tau) d\tau & \frac{3T}{2} \leq t \leq 2T \end{aligned} \right. \quad (IV-5)$$

La mousse de polyuréthane présente un effet de mémoire lors des essais de compression/décompression multicycles. C'est-à-dire que les réponses du cycle 1 présentent une grande influence sur le cycle 2 et donc sur les suivants. Donc, pour la modélisation du comportement viscoélastique du cycle 2, il faut bien considérer les effets du cycle 1. La figure IV-3 montre que la relation entre la déformation et le temps pour les cycles 1 et 2. Dans la figure IV-3, on constate que la courbe du cycle 1 a la même forme avec le cycle 2 (triangle). Les relations entre la déformation et le temps sont également linéaires.

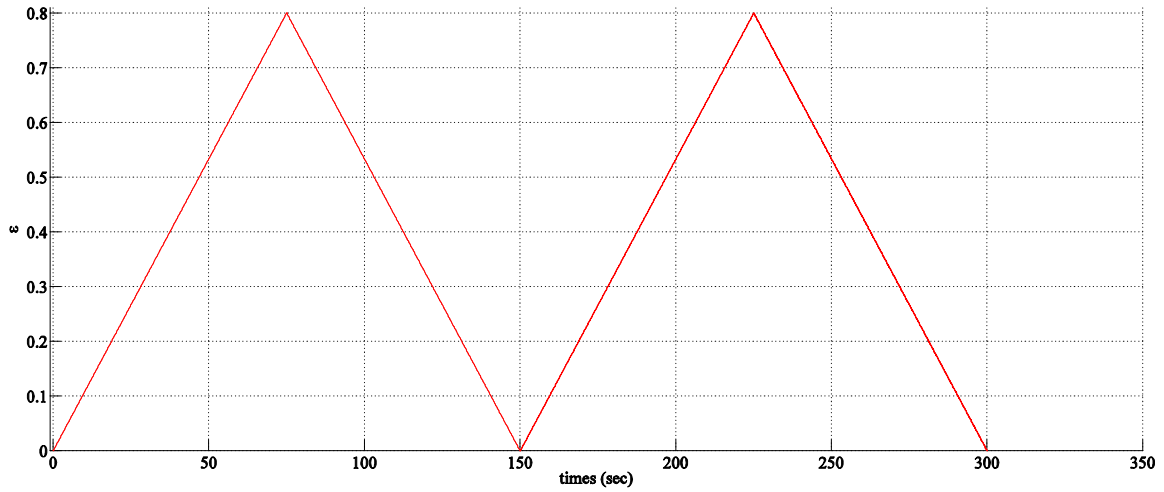


Figure IV-3 Courbe déformation-temps pour le cycle 2

Selon la figure IV-3, les expressions de déformation-temps pour le cycle 2 sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \varepsilon^{2,L}(\tau) &= \frac{2\varepsilon_{\max}}{T}\tau - 2\varepsilon_{\max} & \left(T \leq \tau \leq \frac{3T}{2}\right) \\ \varepsilon^{2,UL}(\tau) &= -\frac{2\varepsilon_{\max}}{T}\tau + 4\varepsilon_{\max} & \left(\frac{3T}{2} \leq \tau \leq 2T\right) \end{aligned} \quad (\text{IV-6})$$

On trouve que l'équation IV-4 (pour le cycle 1) et l'équation IV-6 (pour le cycle 2) ont la même pente pour la charge et la décharge.

- 3^{ème} cycle

Du fait de la théorie de l'effet mémoire de la mousse de polyuréthane, le comportement viscoélastique du cycle 3 dépend les deux cycles précédents (cycle 1 et cycle 2). Les équations sont donc :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \sigma_v^{3,L}(t) &= \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\
 &\quad \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{3T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{3T}{2}}^{2T} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,UL} e^{-\beta_i^{2,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{2,UL}(\tau) d\tau + \\
 &\quad \int_{2T}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{3,L} e^{-\beta_i^{3,L}(t-\tau)} \varepsilon^{3,L}(\tau) d\tau \quad 2T \leq t \leq \frac{5T}{2} \quad (IV-7) \\
 \sigma_v^{3,UL}(t) &= \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\
 &\quad \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{3T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{3T}{2}}^{2T} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,UL} e^{-\beta_i^{2,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{2,UL}(\tau) d\tau + \\
 &\quad \int_{2T}^{\frac{5T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{3,L} e^{-\beta_i^{3,L}(t-\tau)} \varepsilon^{3,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{5T}{2}}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{3,UL} e^{-\beta_i^{3,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{3,UL}(\tau) d\tau \quad \frac{5T}{2} \leq t \leq 3T
 \end{aligned} \right.$$

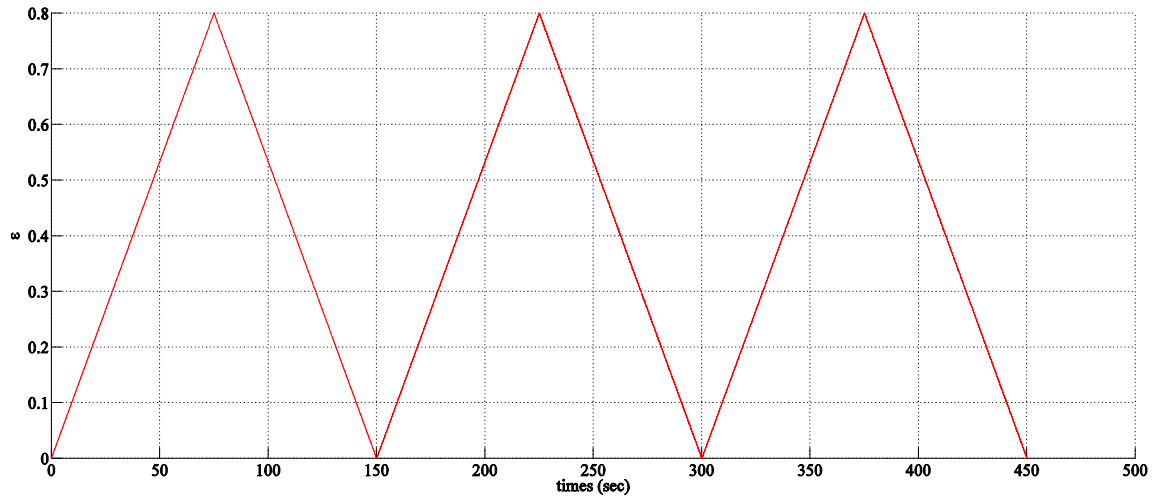


Figure IV-4 Courbe d'effort-temps pour le cycle 3

Dans la figure IV-4, la relation entre la déformation et le temps pour le cycle 3 est donnée par l'équation :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon^{3,L}(\tau) &= \frac{2\varepsilon_{\max}}{T} \tau - 4\varepsilon_{\max} & \left(2T \leq \tau \leq \frac{5T}{2} \right) \\
 \varepsilon^{3,UL}(\tau) &= -\frac{2\varepsilon_{\max}}{T} \tau + 6\varepsilon_{\max} & \left(\frac{5T}{2} \leq \tau \leq 3T \right)
 \end{aligned} \quad (IV-8)$$

- 4^{ème} cycle

De la même façon nous pouvons décrire le comportement de la mousse lors du cycle 4, les équations ont la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sigma_v^{4,L}(t) = \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_T^{\frac{3T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{3T}{2}}^{2T} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,UL} e^{-\beta_i^{2,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{2,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_{2T}^{\frac{5T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{3,L} e^{-\beta_i^{3,L}(t-\tau)} \varepsilon^{3,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{5T}{2}}^{3T} \sum_{i=1}^2 a_i^{3,UL} e^{-\beta_i^{3,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{3,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_{3T}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{4,L} e^{-\beta_i^{4,L}(t-\tau)} \varepsilon^{4,L}(\tau) d\tau \quad 3T \leq t \leq \frac{7T}{2} \\
 \sigma_v^{4,UL}(t) = \int_0^{\frac{T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{1,L} e^{-\beta_i^{1,L}(t-\tau)} \varepsilon^{1,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{T}{2}}^T \sum_{i=1}^2 a_i^{1,UL} e^{-\beta_i^{1,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{1,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_T^{\frac{3T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,L} e^{-\beta_i^{2,L}(t-\tau)} \varepsilon^{2,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{3T}{2}}^{2T} \sum_{i=1}^2 a_i^{2,UL} e^{-\beta_i^{2,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{2,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_{2T}^{\frac{5T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{3,L} e^{-\beta_i^{3,L}(t-\tau)} \varepsilon^{3,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{5T}{2}}^{3T} \sum_{i=1}^2 a_i^{3,UL} e^{-\beta_i^{3,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{3,UL}(\tau) d\tau + \\
 \int_{3T}^{\frac{7T}{2}} \sum_{i=1}^2 a_i^{4,L} e^{-\beta_i^{4,L}(t-\tau)} \varepsilon^{4,L}(\tau) d\tau + \int_{\frac{7T}{2}}^t \sum_{i=1}^2 a_i^{4,UL} e^{-\beta_i^{4,UL}(t-\tau)} \varepsilon^{4,UL}(\tau) d\tau \quad \frac{7T}{2} \leq t \leq 4T
 \end{array} \right. \quad (IV-9)$$

Comme le montre l'équation IV-9, les contraintes viscoélastiques du cycle sont toujours affectées par les contraintes des cycles précédents. La figure IV-5 montre la courbe déformation-temps pour le cycle 4. Elle montre également que les courbes ont les mêmes formes pendant les 4 cycles.

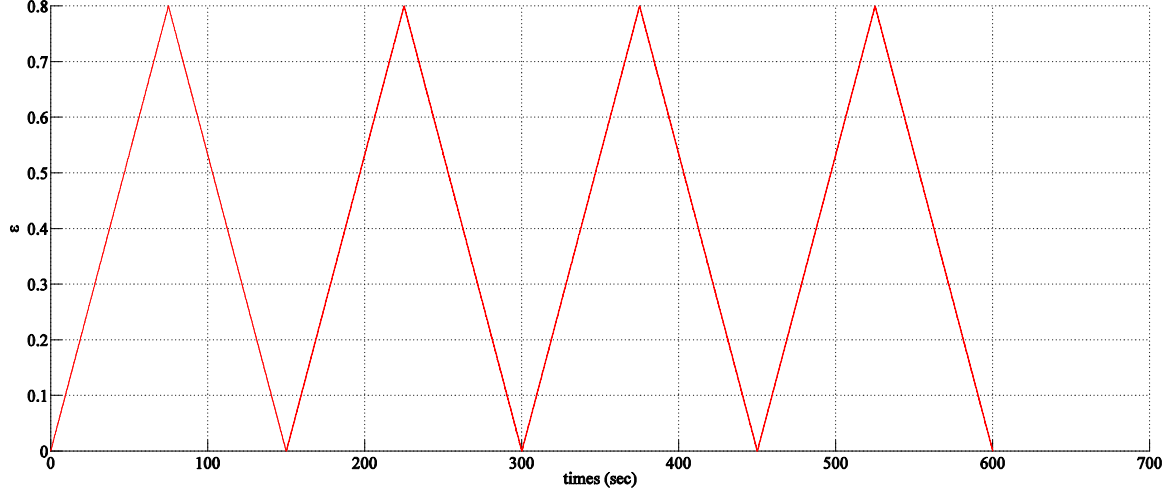


Figure IV-5 Courbe d'effort-temps pour le cycle 4

La relation entre la déformation et le temps pour cycle 4 est donnée par l'équation :

$$\begin{aligned} \varepsilon^{4,L}(\tau) &= \frac{2\varepsilon_{\max}}{T}\tau - 6\varepsilon_{\max} & \left(3T \leq \tau \leq \frac{7T}{2}\right) \\ \varepsilon^{4,UL}(\tau) &= -\frac{2\varepsilon_{\max}}{T}\tau + 8\varepsilon_{\max} & \left(\frac{7T}{2} \leq \tau \leq 4T\right) \end{aligned} \quad (\text{IV-10})$$

Comme dans le chapitre 3, la méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge est utilisée pour la modélisation du comportement viscoélastique des 4 cycles. L'équation est donnée par :

$$\delta\sigma_v = \sigma_v^{i,L} - \sigma_v^{i,UL} \quad (\text{IV-11})$$

avec $i = 1, 2, 3, 4$, représentant le numéro du cycle.

4.2.2 Expression du modèle hyperélastique pour 4 cycles

Selon les résultats des comparaisons entre les trois modèles visco-hyperélastiques du chapitre 3, le modèle d'Ogden est ici utilisé pour simuler le comportement hyperélastique de la mousse de polyuréthane pendant les 4 cycles. Comme montré dans le chapitre 3, l'équation est de la forme:

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + F(J) \quad (\text{IV-12})$$

Dans notre travail, nous avons fait l'hypothèse qu'il n'existe que la déformation sur la direction principale, c'est-à-dire dans la direction de compression. Le matériau a donc un coefficient de Poisson égal à zéro. L'expression de la contrainte hyperélastique avec l'équation IV-12 devient donc:

$$\sigma_e = \lambda^{-1} \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - 1) \quad (\text{IV-13})$$

L'équation IV-13 permet de modéliser le comportement hyperélastique de la mousse pendant 4 cycles. Avec $\lambda = 1 + \varepsilon$, les expressions hyperélastiques pendant 4 cycles sont données par l'équation IV-14.

$$\sigma_{e_i} = (1 + \varepsilon)^{-1} \sum_{n=1}^N \mu_{n,i} \left((1 + \varepsilon)^{\alpha_{n,i}} - 1 \right) \quad (i-1)T \leq t \leq iT \quad (\text{IV-14})$$

avec $i = 1, 2, 3, 4$ représentent le numéro du cycle.

4.3 Résultats de l'identification sur 3 mousses avec 3 vitesses

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'identification sur trois mousses (mousse A, B et C) avec trois vitesses (test 1, test 2 et test 3) lors de 4 cycles de compression/décompression. Nous montrons tout d'abord les résultats de la mousse A pour 3 vitesses lors des 4 cycles. Puis, nous présentons les résultats de la mousse B et ensuite les résultats de la mousse C. Enfin, les résultats des comparaisons entre les trois mousses pour les 3 vitesses sont également détaillés.

4.3.1 Résultats de la mousse A pour 3 vitesses lors des 4 cycles

4.3.1.1 Résultats de la mousse A pour le test 1 lors des 4 cycles

Du fait de la méthode de différence de contrainte entre la charge et décharge utilisé pour la modélisation du comportement viscoélastique de la mousse pendant 4 cycles présentée dans la section 4.2, nous présentons les résultats expérimentaux de différences de contraintes expérimentales entre la charge et décharge par la figure IV-6. Les courbes en violets sont les différences de contraintes maximales, les courbes en bleu sont les différences de contraintes minimales et les courbes en noir sont les différences de contraintes moyennes.

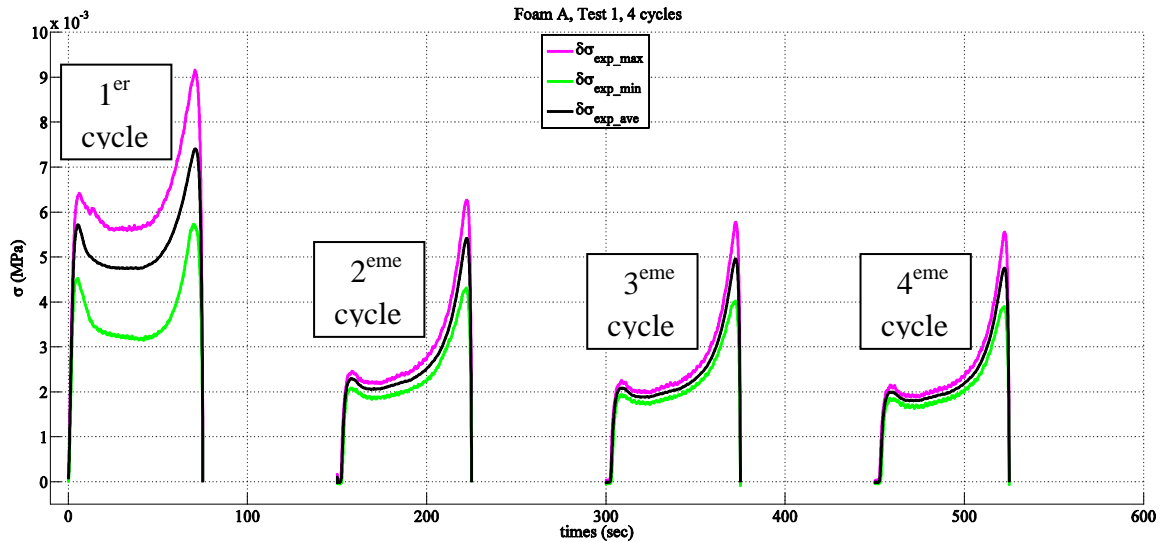


Figure IV-6 Résultats expérimentaux : Différences de contraintes entre la charge et décharge pour la mousse A (test 1)

La figure IV-6 montre que la différence de contrainte pour le 1^{er} cycle est plus grande que pour les cycles 2, 3 et 4, alors que les différences de contraintes pour les cycles 2, 3 et 4 sont presque semblables. La figure IV-7 montre les comparaisons des résultats entre les courbes de différences de contraintes entre la charge et décharge expérimentales et analytiques pour la mousse A dans le cas du test 1 sur 4 cycles.

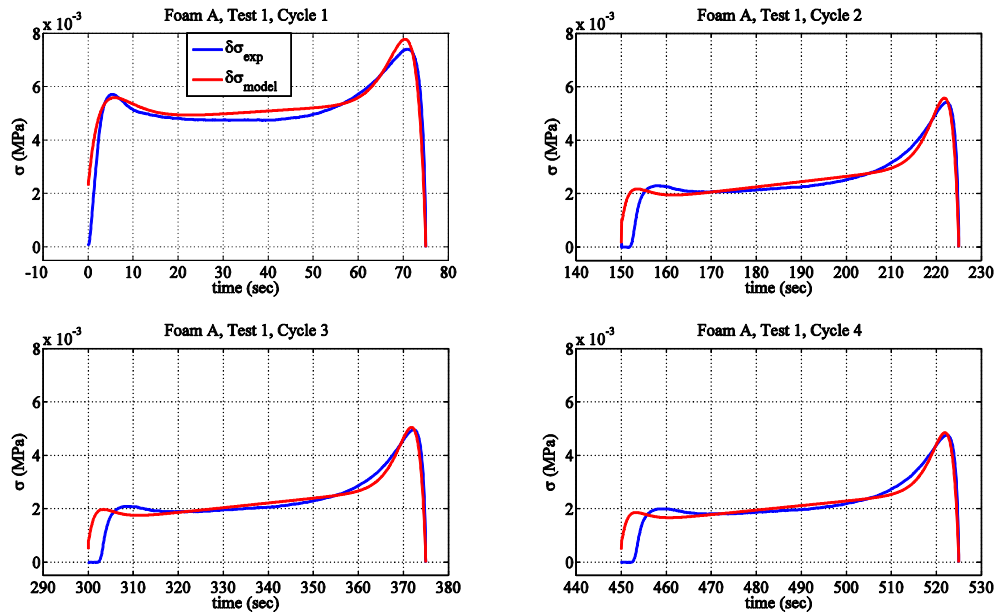


Figure IV-7 Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse A (test 1)

On constate que la courbe de différence de contrainte entre la charge et décharge analytique du cycle 1 présente une bonne concordance avec la courbe expérimentale. Les courbes analytiques des cycles 2, 3 et 4 présentent également une bonne adéquation sauf un décalage initial par rapport aux courbes expérimentales. Cette observation peut être expliquée en analysant la contrainte résiduelle. En effet, à la fin du test, la mousse perd le contact avec la cellule de force (plateau supérieur du dispositif d'essai) et la contrainte résiduelle ne permet pas à la mousse de retourner à sa position initiale.

Les résultats d'identification des paramètres du modèle à mémoire entier pour la mousse A pour 4 cycles dans le cas du test 1 sont regroupés dans le tableau IV-1.

Tableau IV-1. Valeurs des paramètres viscoélastiques de 4 cycles pour la mousse A (test 1)

		Paramètres de charges				Paramètres de décharge			
		X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)
Mousse A	Test 1	Cy1	40.45	0.16	-219.35	22023.9	41.43	0.17	-225.38
		Cy2	65.24	0.30	-250.19	22023.9	64.74	0.32	-260.19
		Cy3	68.61	0.32	-252.88	22023.9	67.76	0.34	-261.48
		Cy4	71.86	0.33	-251.87	22023.9	70.37	0.35	-260.55

Tableau IV-2. Erreurs relatives des paramètres viscoélastiques de 4 cycles (Mousse A, test 1)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	5.4%	8.07%	8.11%	8.81%

Les erreurs d'identification de la partie viscoélastique sont données dans le tableau IV-2. On constate que la valeur des erreurs des paramètres viscoélastiques du 1^{er} cycle est plus faible que pour les cycles 2, 3 et 4. Cette observation est en concordance avec la figure IV-7. On constate dans ce tableau que les erreurs s'accroissent avec l'augmentation des cycles. Les paramètres viscoélastiques du tableau IV-1 permettent de reconstruire les contraintes viscoélastiques de la mousse A dans le cas du test 1 pour 4 cycles. Ces contraintes sont présentées sur la figure IV-8 et montrent que la contrainte viscoélastique de cycle 1 est plus grande que dans les cycles 2, 3 et 4.

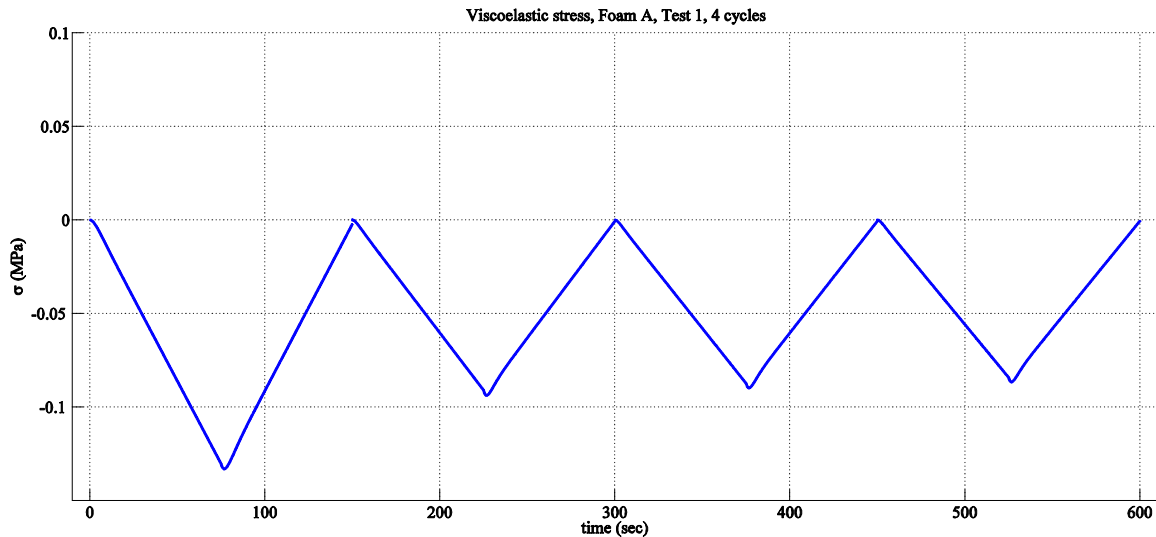


Figure IV-8 Contraintes visco élastiques du modèle de la mousse A dans le test 1 pour 4 cycles

Après avoir obtenu les contraintes viscoélastiques de la mousse pendant 4 cycles, les contraintes hyperélastiques expérimentales peuvent être obtenues par les soustractions entre les contraintes globales et les contraintes viscoélastiques. En utilisant le modèle d'Ogden (Equation IV-14), les courbes de contraintes hyperélastiques issues de la modélisation et celles issues l'expérimentation sont données par la figure IV-9.

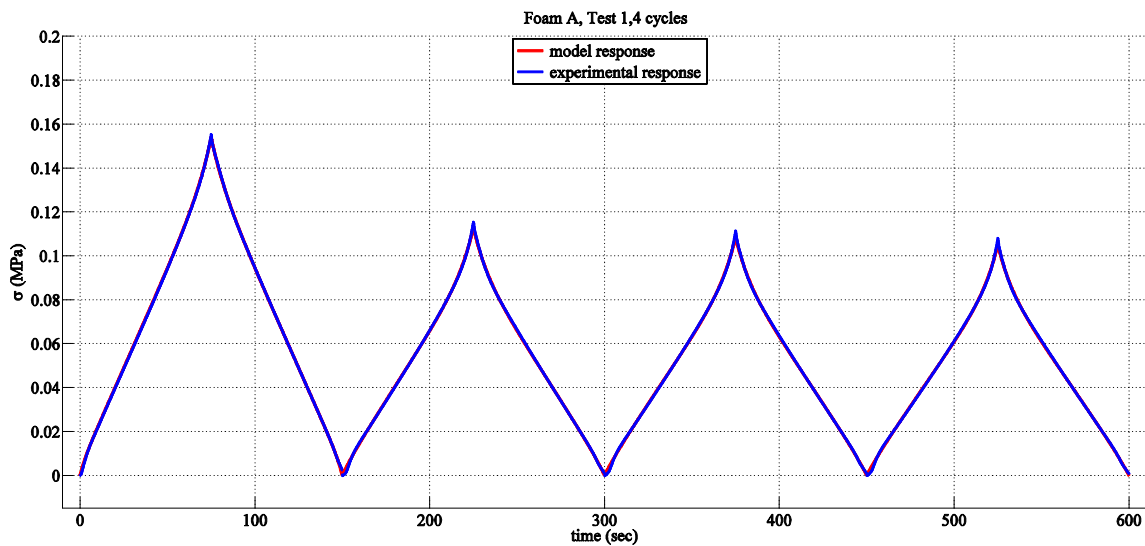


Figure IV-9 Comparaison des courbes expérimentales et modèles des contraintes hyperélastiques

Sur la figure IV-9, il est montré que les courbes analytiques sont en bonne concordance avec les courbes hyperélastiques expérimentales. Les valeurs des paramètres hyperélastiques (modèle d'Ogden) sont regroupées dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3. Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden (mousse A, test 1, 4 cycles)

			μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse A	Test 1	Cy1	25.15	1.63	-25.14	1.62	0.0038	34.33
		Cy2	76.07	1.77	-76.05	1.76	0.0018	21.34
		Cy3	67.61	1.79	-67.59	1.79	0.0015	20.12
		Cy4	83.08	1.81	-83.07	1.81	0.0013	20.18

Comme le montre le tableau IV-3, les valeurs des paramètres hyperélastiques du cycle 1 présentent une grande différence que celle des cycles 2, 3 et 4 pour la mousse A dans le cas du test 1. Les erreurs d'identification du modèle d'Ogden sont données dans le tableau IV-4.

Tableau IV-4. Erreurs des paramètres hyperélastiques de 4 cycles pour la mousse A (test 1)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	0.36%	0.62%	0.69%	0.72%

Le tableau IV-4 montre que les erreurs d'identification des paramètres hyperélastiques sont cumulées avec l'augmentation des cycles. Avec les résultats viscoélastiques obtenus par le modèle à mémoire entier et les résultats hyperélastiques obtenus par le modèle d'Ogden, la figure IV-10 montre la reconstruction de la contrainte viscoélastique, de la contrainte hyperélastique et de la contrainte globale. On remarque que la contrainte hyperélastique est de signe positif et la contrainte viscoélastique est de signe négatif. On en déduit donc que la contrainte viscoélastique est toujours opposée à la contrainte globale. Le comportement viscoélastique modélise l'effet de relaxation, ce qui explique la contrainte résiduelle à la fin du test.

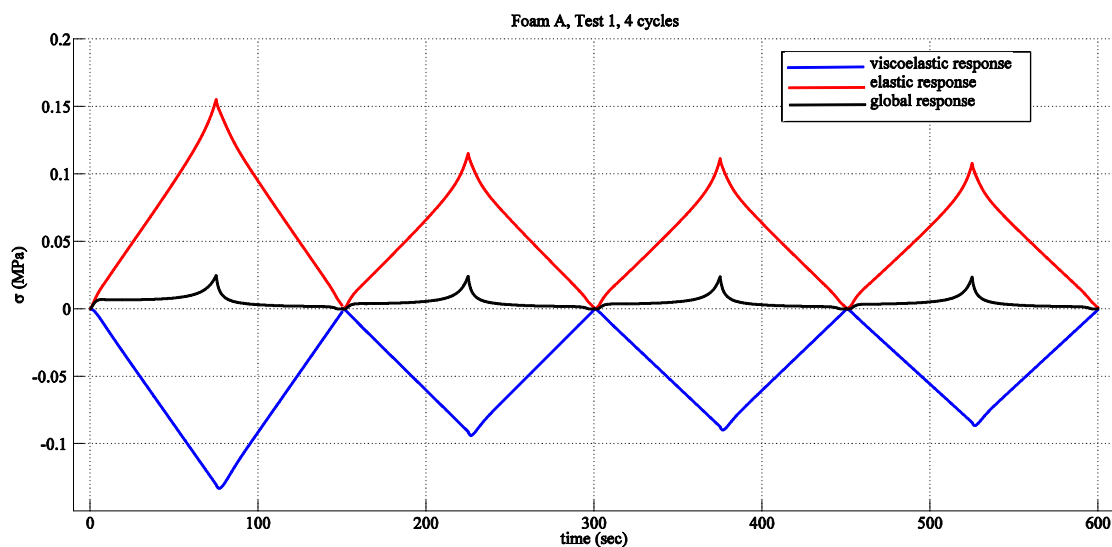


Figure IV-10 Reconstruction de la contrainte viscoélastique, de la contrainte hyperélastique et de la contrainte globale pour la mousse A (test 1)

D'une façon globale, la figure IV-11 montre que les courbes contrainte-déformation simulées par le modèle visco-hyperélastique d'Ogden présentent une bonne concordance avec les réponses expérimentales.

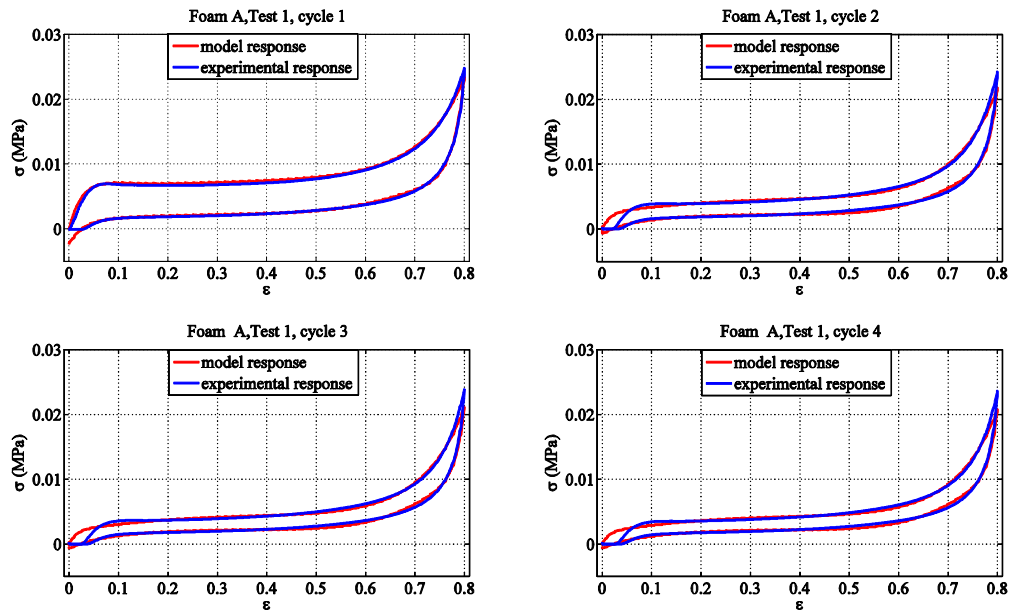


Figure IV-11 Courbes contrainte-déformation globales pour la mousse A (test 1)

On remarque également que les courbes du 1^{er} cycle montrent une meilleure adéquation que les courbes des cycles 2, 3 et 4. En particulier, on constate que les courbes des cycles 2, 3 et 4 reconstruites à partir de la modélisation présentent des décalages initiaux par rapport aux courbes expérimentales. Cette observation peut être expliquée par le comportement viscoélastique de la mousse. C'est-à-dire, qu'à la fin de premier cycle, la mousse perd le contact avec le plateau du dispositif d'essai, et qu'au commencement du cycle 2, alors que la mousse n'est pas revenue à sa position initiale, le dispositif d'essai continue à bouger vers la direction de compression des mousses jusqu'à rencontrer les mousses qui sont encore en train de retourner la position initiale.

Les erreurs d'identification du modèle global (modèle visco-hyperélastique d'Ogden) sont données dans le tableau IV-5.

Tableau IV-5. Erreurs globales des paramètres des 4 cycles pour la mousse A (test 1)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	3.16%	5.41%	5.96%	6.26%

On constate que les erreurs globales d'estimation par le modèle visco-hyperélastique d'Ogden ne dépassent pas 7% pour la mousse A dans le cas du test 1 et on observe également une accumulation des erreurs avec l'augmentation des cycles.

4.3.1.2 Résultats de la mousse A pour le test 2 lors des 4 cycles

Dans le paragraphe 4.3.1.1, nous avons présenté les résultats de la mousse A lors du test 1 pendant les 4 cycles. Dans cette section, nous nous intéressons à l'étude de la mousse A dans le cas du test 2 pendant 4 cycles. La figure IV-12 montre les comparaisons des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contraintes entre la charge et la décharge pour la mousse A dans le cas du test 2. Les courbes analytiques (en rouge) sont en bonne concordance avec les courbes expérimentales (en bleu). Comme le montre le test 1 (figure IV-7), le résultat de la modélisation du cycle 1 est meilleur que les résultats des cycles 2, 3 et 4.

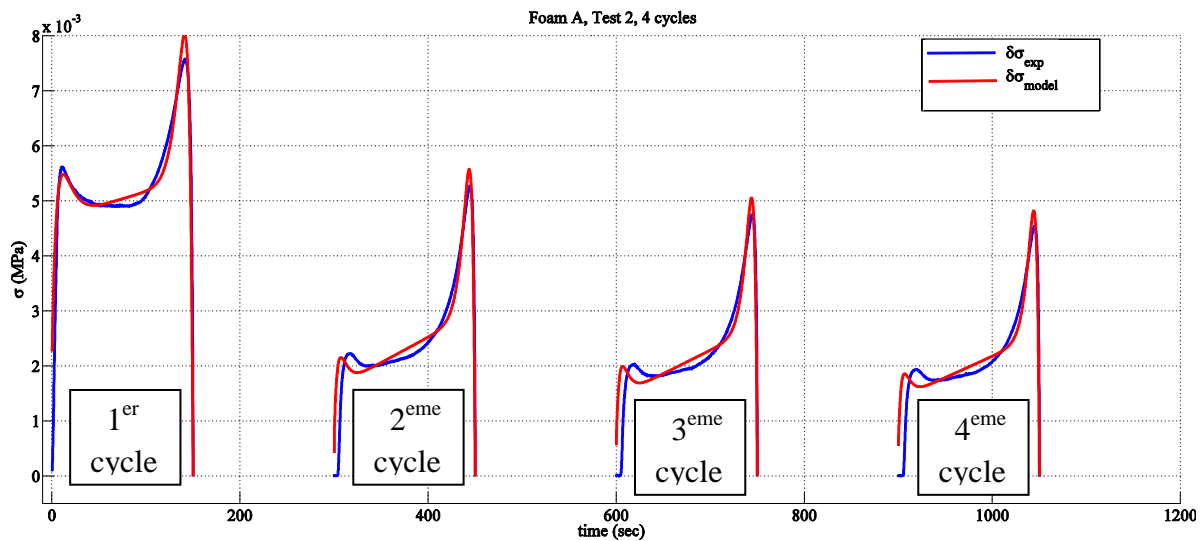


Figure IV-12 Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse A dans le cas du test 2

Le tableau IV-6 présente les valeurs des paramètres viscoélastiques du modèle à mémoire entier pour la mousse A dans le cas du test 2 pendant 4 cycles. De même, les valeurs sont différentes entre la charge et la décharge.

Tableau IV-6. Valeurs des paramètres viscoélastiques du modèle à mémoire (mousse A, test 2)

		Paramètres charges				Paramètres déchargés			
		X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)
Mousse A	Test 2	Cy1	41.33	0.16	-219.13	22023.9	42.23	0.17	-226.4
		Cy2	63.17	0.30	-249.51	22023.9	62.78	0.32	-259.5
		Cy3	64.33	0.31	-249.66	22023.9	64.14	0.33	-258.9
		Cy4	68.61	0.32	-248.73	22023.9	67.87	0.34	-257.6

Le tableau IV-7 montre les erreurs des paramètres viscoélastiques de 4 cycles pour la mousse A dans le test 2. Il montre que les erreurs sont cumulées lors du passage d'un cycle à un autre, et qu'il existe une grande différence entre le cycle 1 et le cycle 2. De même que précédemment, les erreurs ne présentent pas de grande différence entre les cycles 2, 3 et 4.

Tableau IV-7. Erreurs des paramètres viscoélastiques des 4 cycles pour la mousse A (test 2)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	4.11%	7.46%	8.45%	8.51%

Avec ces paramètres, les contraintes viscoélastiques de la mousse A lors du test 2 pour les 4 cycles peuvent être estimées. Les contraintes hyperélastiques expérimentales sont également obtenues par la soustraction entre les contraintes expérimentales et les contraintes viscoélastiques calculées précédemment.

La figure IV-13 montre les comparaisons entre les courbes hyperélastiques expérimentales et les courbes analytiques qui sont obtenues par le modèle d'Ogden. On voit que les courbes du modèle présentent une très bonne concordance avec les courbes expérimentales. La contrainte hyperélastique du cycle 1 est plus grande que celle des cycles 2, 3 et 4. Les contraintes hyperélastiques pour les cycles 2,3 et 4 sont quasiment identiques.

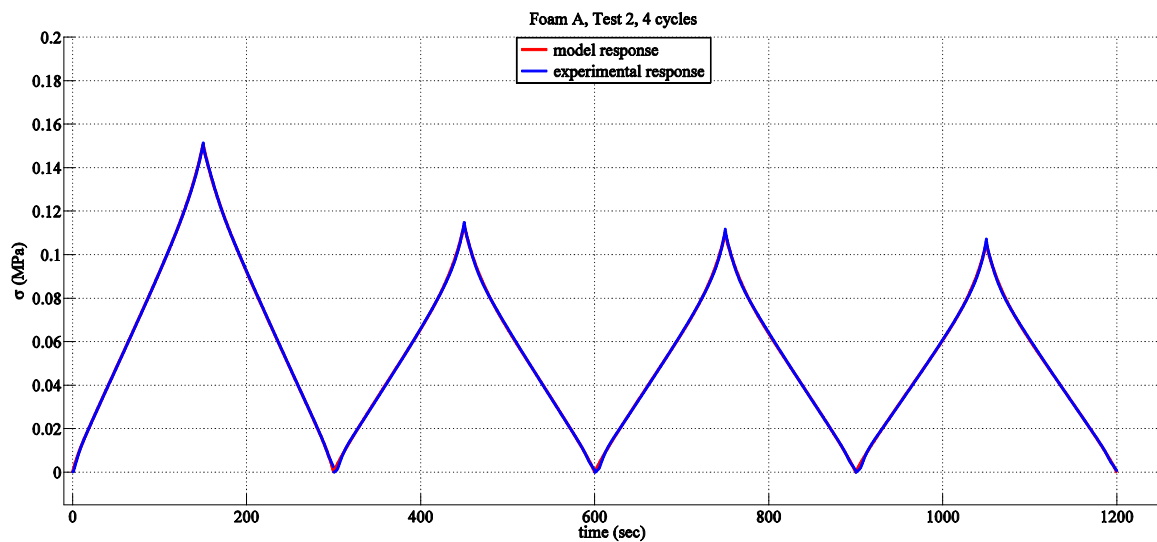


Figure IV-13 Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la contrainte hyperélastique pour la mousse A dans le cas du test 2

Les valeurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse A dans le test 2 sont regroupées dans le tableau IV-8 et montrent les mêmes tendances avec les résultats dans le cas du test 1 (tableau IV-3).

Tableau IV-8. Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden des 4 cycles (mousse A, test 2)

		μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse A	Cy1	34.76	1.63	-34.75	1.62	0.0038	32.74
	Cy2	62.47	1.78	-62.46	1.78	0.0019	23.97
	Cy3	54.56	1.79	-59.22	1.79	0.0016	21.93
	Cy4	59.23	1.79	-59.22	1.79	0.0016	23.10

Les erreurs des paramètres hyperélastiques des 4 cycles pour la mousse A dans le test 2 sont données par le tableau IV-9. La valeur du cycle 1 est plus petite que les autres trois cycles. Toutes les erreurs sont inférieures à 1%.

Tableau IV-9. Erreurs des paramètres hyperélastiques des 4 cycles pour la mousse A (test 2)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	0.16%	0.56%	0.63%	0.67%

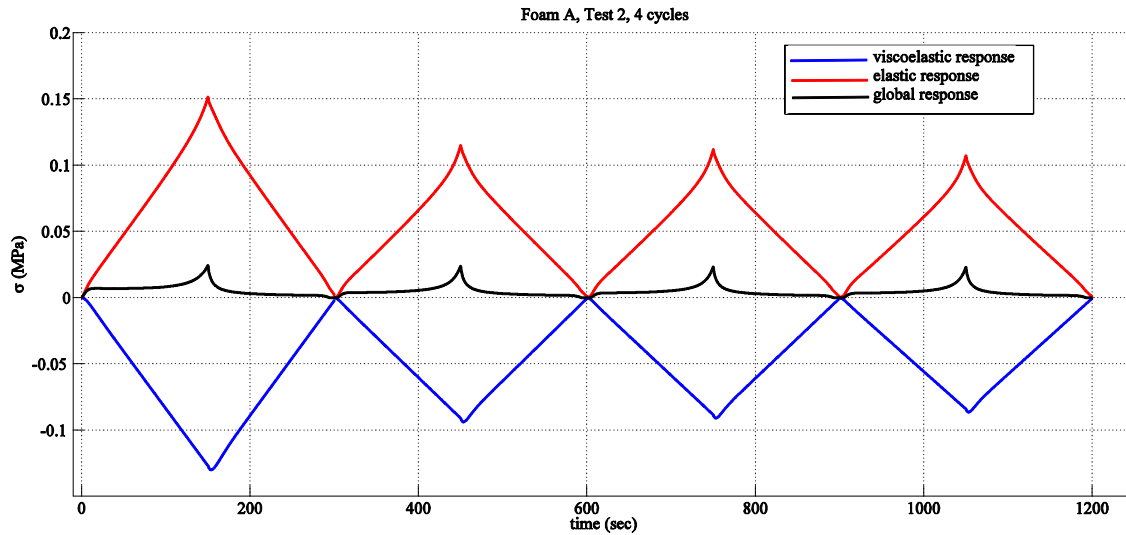


Figure IV-14 Reconstruction de la contrainte viscoélastique, de la contrainte hyperélastique et de la contrainte globale pour la mousse A dans le cas du test 2

La figure IV-14 présente les réponses viscoélastiques, les réponses hyperélastiques et les réponses globales du modèle visco-hyperélastique d'Ogden de la mousse A dans le cas du test 2. Les contraintes viscoélastiques sont de signe négatif et elles sont contraires aux contraintes hyperélastiques. La figure IV-15 présente les résultats globaux. Elle montre que les réponses prévues par le modèle sont en bonne concordance avec les réponses expérimentales. Les erreurs globales du modèle pour la mousse A dans le cas du test 2 des 4 cycles sont présentées par le tableau IV-10. Les erreurs sont également accumulées avec l'augmentation des cycles.

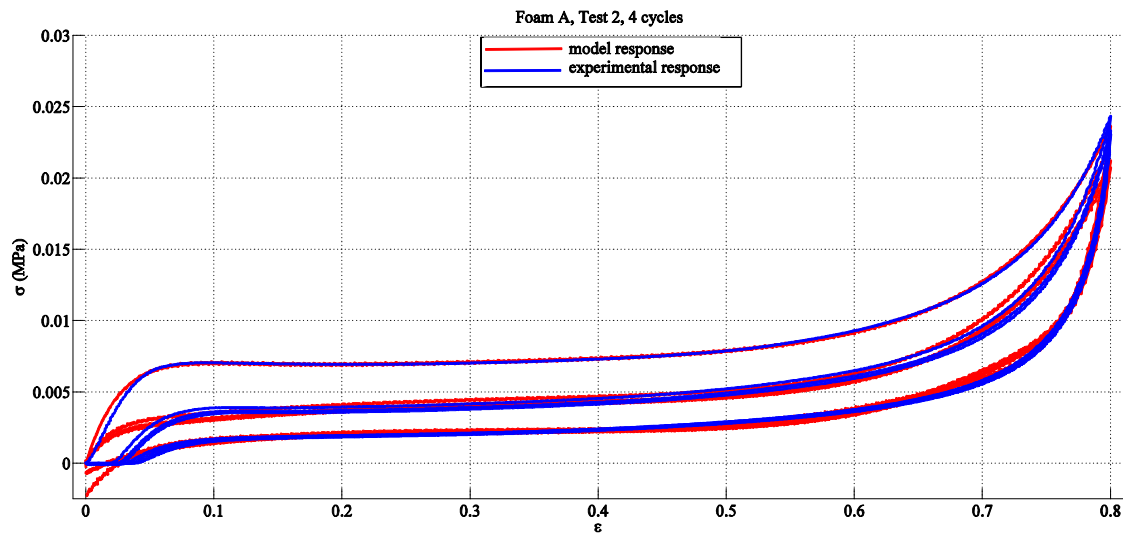


Figure IV-15 Courbes contrainte-déformation globales pour la mousse A dans le cas du test 2

Tableau IV-10. Erreurs globales des paramètres des 4 cycles pour la mousse A (test 2)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	2.08%	5.11%	5.67%	5.97%

4.3.1.3 Résultats de la mousse A pour le test 3 lors des 4 cycles

Toujours dans un but de comparer les différences de la mousse A entre les trois tests pendant 4 cycles, nous présentons les résultats dans le cas du test 3. La figure IV-16 montre les comparaisons entre les courbes de différences de contraintes entre la charge et la décharge expérimentales et les courbes du modèle pour la mousse A dans le cas du test 3 des 4 cycles.

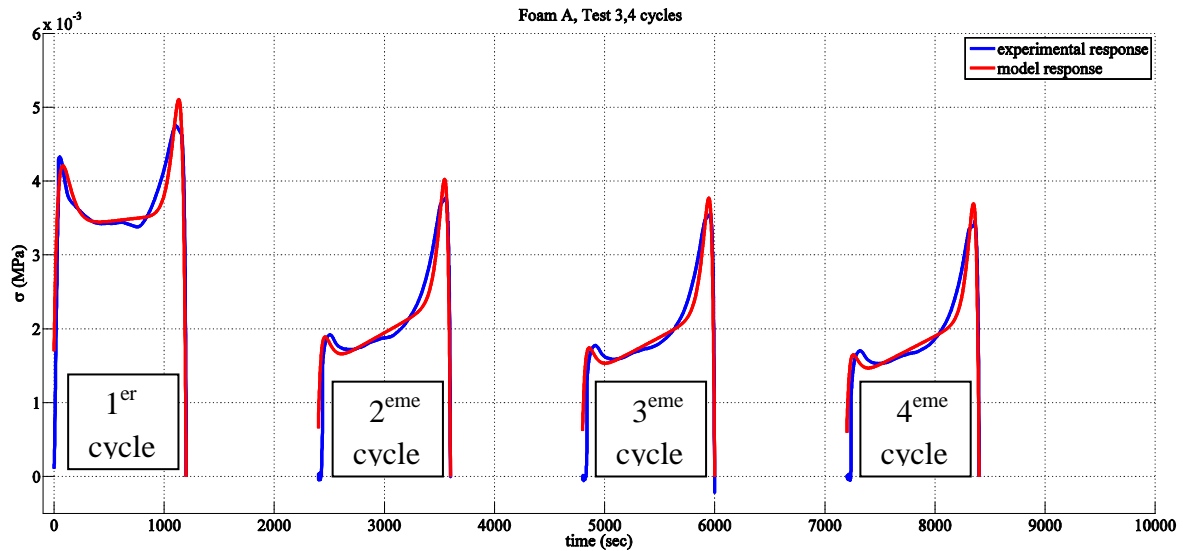


Figure IV-16 Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contraintes entre la charge et la décharge pour la mousse A dans le cas du test 3 des 4 cycles

Le tableau IV-11 présente les valeurs des paramètres viscoélastiques des 4 cycles (modèle à mémoire entier) et le tableau IV-12 montre les erreurs des paramètres viscoélastiques des 4 cycles pour la mousse A dans le cas du test 3.

Tableau IV-11. Valeurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A (test 3)

		Paramètres charges				Paramètres déchargés			
		X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)
Mousse A	Test 3	Cy1	44.25	0.19	-230.7	22023.9	44.99	0.19	-232.9
		Cy2	59.74	0.22	-196.1	22024.4	59.87	0.23	-202.6
		Cy3	61.71	0.22	-192.0	22023.9	61.55	0.23	-197.9
		Cy4	64.70	0.23	-194.7	22023.9	64.65	0.25	-201.4

Tableau IV-12. Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A (test 3)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	4.32%	6.16%	6.16%	6.98%

La figure IV-17 montre les comparaisons entre les courbes hyperélastiques expérimentales et les courbes analytiques pour les 4 cycles. Le tableau IV-13 donne les valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden des 4 cycles pour la mousse A dans le cas du test 3. Les valeurs des paramètres de $\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$ sont quasiment les mêmes pendant les 4 cycles. Cependant, les valeurs de μ_3 et α_3 présentent une différence. Cette observation ne présente pas la même tendance que celle des tests 1 et 2.

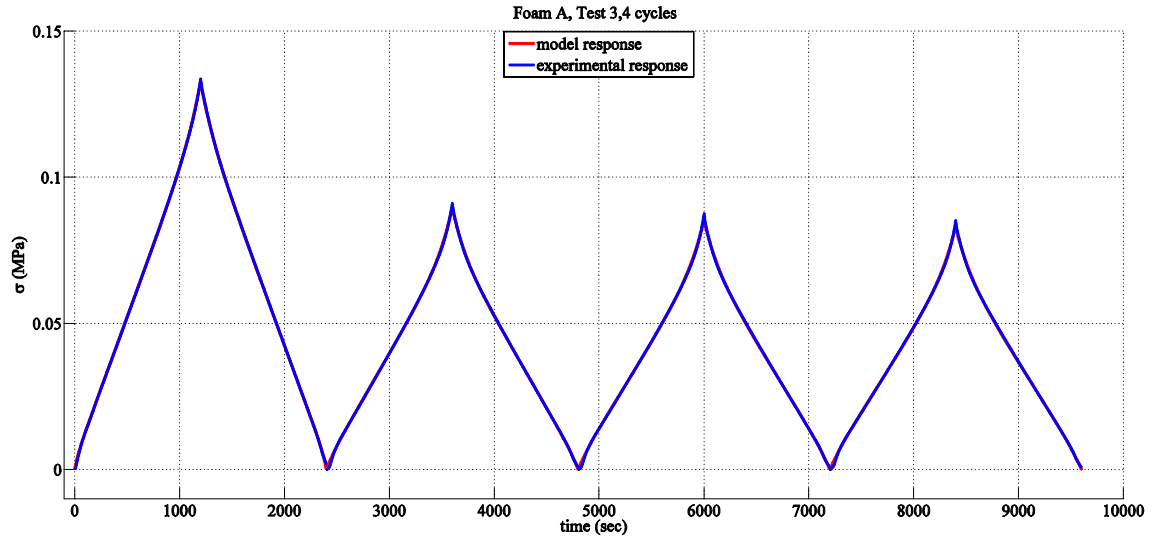


Figure IV-17 Comparaison des courbes hyperélastiques pour la mousse A dans le cas du test 3

Tableau IV-13. Valeurs des paramètres hyperélastiques d'Ogden de 4 cycles test 3

			μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse A	Test 3	Cy1	25.13	1.64	-25.13	1.63	0.0027	49.73
		Cy2	25.13	1.77	-25.13	1.76	0.0010	29.75
		Cy3	25.13	1.69	-25.13	1.69	0.0024	16.81
		Cy4	25.13	1.69	-25.13	1.69	0.0024	15.41

La figure IV-18 montre finalement les résultats globaux des modèles qui sont en bonne concordance avec les réponses expérimentales et le tableau IV-14 donne les erreurs globales.

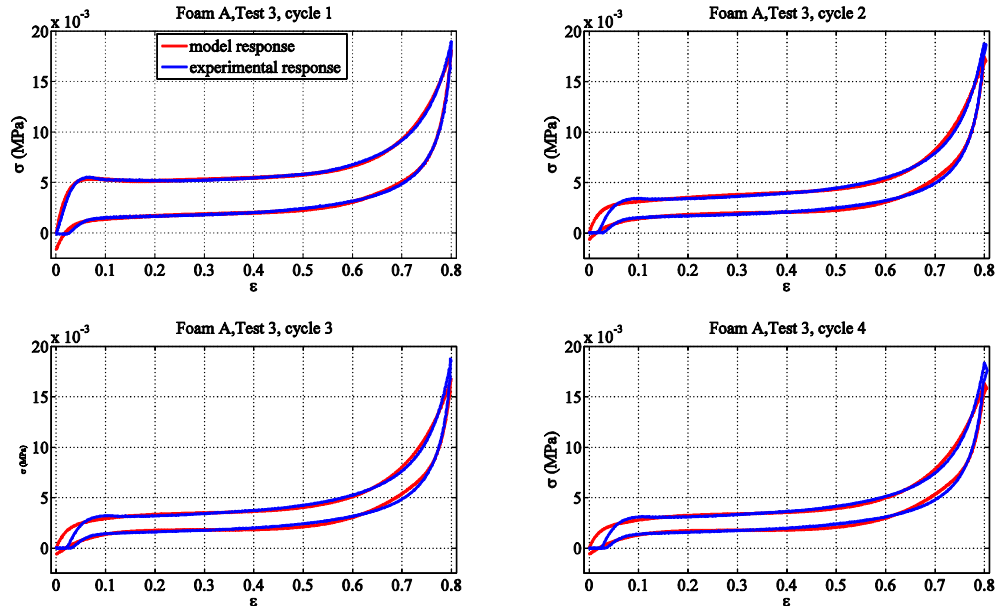


Figure IV-18 Courbes contrainte-déformation globales (mousse A, test 3, 4 cycles)

Tableau IV-14. Erreurs globales des paramètres des 4 cycles (mousse A, test 3, 4 cycles)

	Cy1	Cy2	Cy3	Cy4
Erreurs	2.41%	4.53%	5.85%	5.88%

4.3.1.4 Comparaison des trois tests pour la mousse A lors des 4 cycles

Dans cette partie, nous présentons les résultats des comparaisons de la mousse A sur les trois tests pendant les 4 cycles. La figure IV-19 montre les résultats des contraintes hyperélastiques obtenues par le modèle d'Ogden pour la mousse A sur les trois vitesses (test 1, test2 et test 3) des 4 cycles. On constate que les contraintes hyperélastiques maximales entre le test 1 et test 2 ne présentent pas de grande différence pour chaque cycle. Cependant, les contraintes hyperélastiques maximales dans le cas du test 3 présentent un décalage par rapport aux tests 1 et 2. Ces observations se retrouvent sur les 4 cycles.

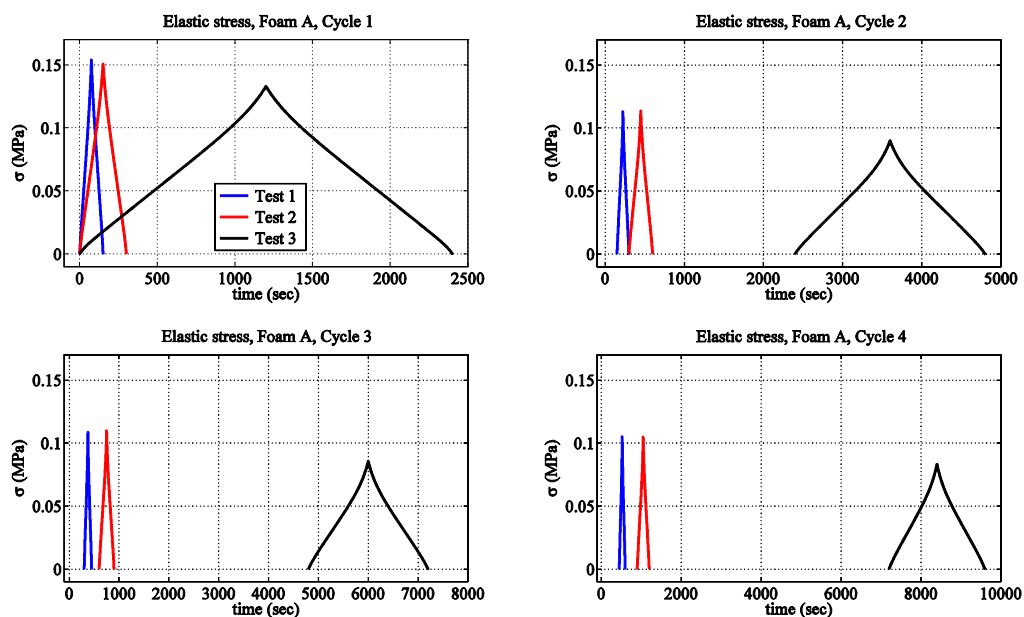


Figure IV-19 Comparaisons des contraintes hyperélastiques sur trois tests pour la mousse A

Il est également montré sur la figure IV-19 que le cycle 1 a une plus grande contrainte hyperélastique que les autres cycles 2, 3 et 4. Cependant, les contraintes hyperélastiques des cycles 2, 3 et 4 ne montrent pas de grandes différences. Les comparaisons des erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse A sont regroupées dans le tableau IV-15.

Tableau IV-15. Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse A

			Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse A	Test 1	hyperélastique		0.36	0.62	0.69	0.72
	Test 2	hyperélastique		0.16	0.56	0.63	0.67
	Test 3	hyperélastique		0.19	0.52	0.64	0.66

La figure IV-20 donnent les résultats viscoélastiques de la mousse A sur trois vitesses pendant les 4 cycles. Elle montre les mêmes tendances que les réponses hyperélastiques, de plus on remarque que les valeurs du test 3 sont plus petites que les résultats du test 1 et 2 et que les réponses du cycle 1 sont plus grandes que les cycles 2, 3 et 4. Elles sont toutes de signe

opposé aux contraintes hyperélastiques. Les erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A sur les trois tests sont donnés par le tableau IV-16.

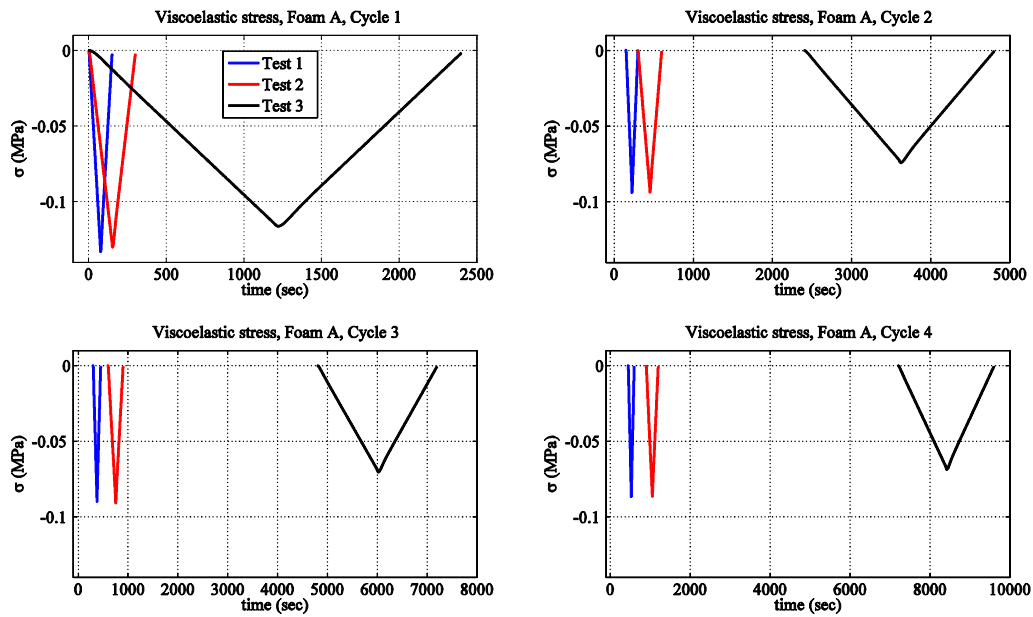


Figure IV-20 Comparaisons des contraintes viscoélastiques sur les trois tests pour la mousse A

Tableau IV-16. Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse A

Erreurs			Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse A	Test 1	Viscoélastique	5.41	8.07	8.11	8.81
	Test 2	Viscoélastique	4.11	7.46	8.45	8.51
	Test 3	Viscoélastique	4.32	6.16	6.16	6.98

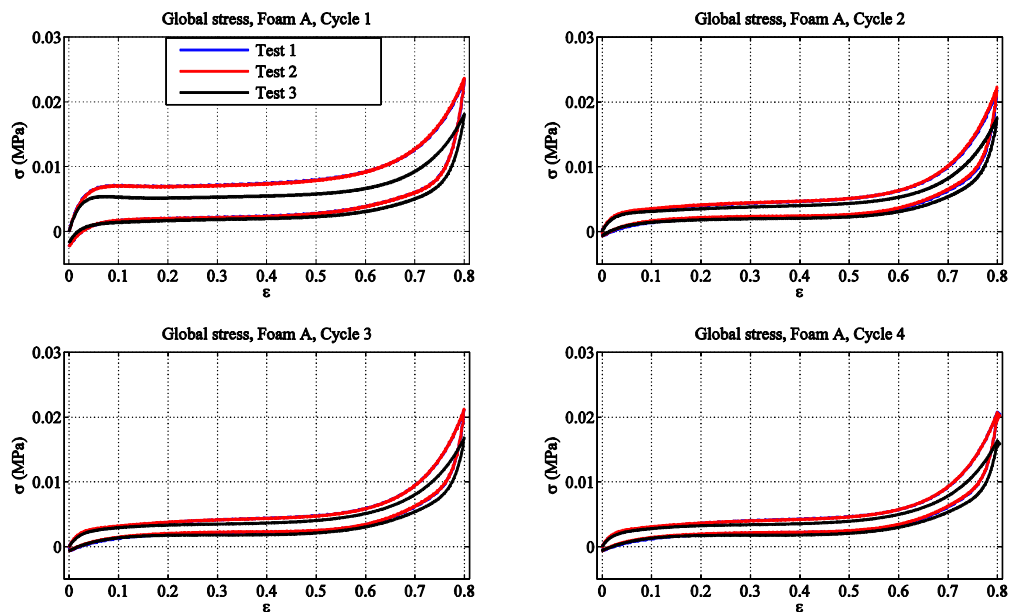


Figure IV-21 Comparaisons des contraintes globales sur les trois tests pour la mousse A

La figure IV-21 montre les courbes contrainte-déformation globales prévues par le modèle visco-hyperélastique d'Ogden de la mousse A sur trois vitesses pendant 4 cycles. Les courbes du test 1 et 2 (en rouge et bleu) sont proches. Cependant, les courbes du test 3 présentent une différence par rapport aux autres tests pour tous les cycles. Cette observation peut être expliquée par une influence importante de la vitesse sur les essais de compression/décompression. Les erreurs globales pour la mousse A sont résumées par le tableau IV-17.

Tableau IV-17. Erreurs globales pour la mousse A

		Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse A	Test 1	globale	3.16	5.41	5.96	6.26
	Test 2	globale	2.08	5.11	5.67	5.97
	Test 3	globale	2.41	4.53	5.85	5.88

4.3.2 Résultats de la mousse B pour 3 vitesses lors des 4 cycles

Nous avons présentés les résultats de la mousse A pour trois vitesses (test 1, 2 et 3) lors de 4 cycles dans la partie 4.3.1. Pour la généralisation du modèle, nous présenterons ici les résultats de la mousse B pour les mêmes 3 vitesses lors de 4 cycles. Les résultats de la différence de contrainte entre la charge et la décharge, les résultats hyperélastiques et les réponses globales dans le cas du test 1 sont présentés. Les résultats dans le cas des tests 2 et 3 sont présentés en annexe.

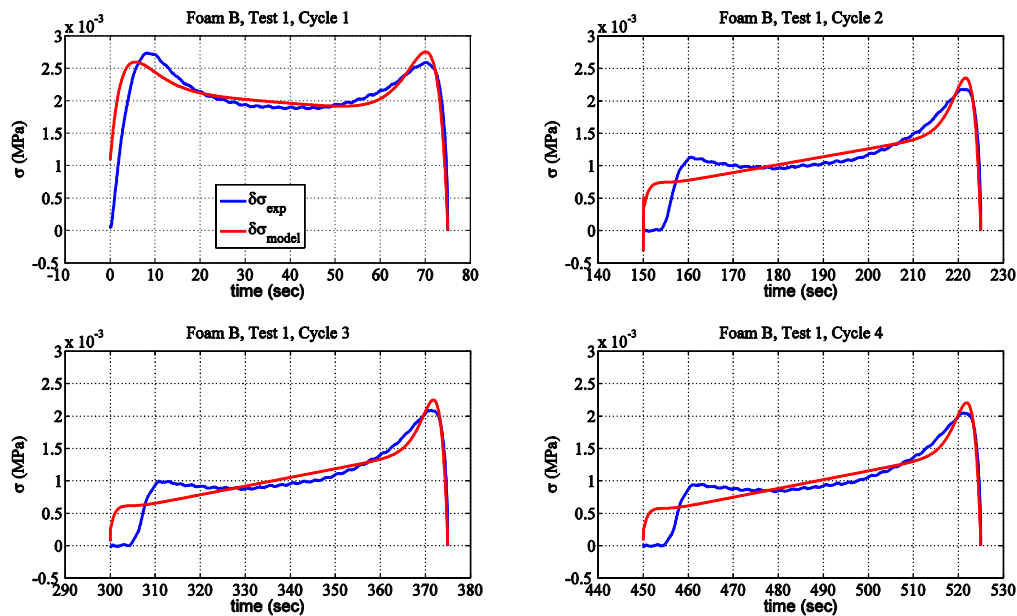


Figure IV-22 Comparaison des courbes expérimentales et analytiques de la différence de contrainte entre la charge et la décharge pour la mousse B dans le cas du test 1

La figure IV-22 montre les comparaisons entre les courbes de différence de contrainte entre la charge et la décharge expérimentale et analytique de la mousse B dans le cas du test 1 pendant les 4 cycles. Elle montre que la réponse analytique est en concordance avec l'expérimentation pour le cycle 1. Cependant, les résultats des cycles 2, 3 et 4 présentent un décalage initial avec les réponses expérimentales. Cette observation est confirmée dans tableau IV-18. En effet, les

erreurs augmentent avec l'accumulation des cycles. Il existe en particulier une grande différence entre le cycle 1 et les trois autres cycles. On constate également que les erreurs diminuent lorsque les vitesses augmentent.

Tableau IV-18. Erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse B

		Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse B	Test 1	Viscoélastique	6.99	14.01	15.03	15.06
	Test 2	Viscoélastique	5.67	12.02	13.01	13.07
	Test 3	Viscoélastique	4.53	10.58	10.63	10.95

Comme le montre le tableau IV-18, les erreurs des paramètres viscoélastiques de la mousse B sont plus grandes que celles de la mousse A (Tableau IV-16), en particulier sur les cycles 2, 3 et 4. Cette observation peut être expliquée par les différences des capacités visqueuses entre les différentes mousses. En fait, selon les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre II (figure II-13), la mousse B présente une contrainte résiduelle plus grande que la mousse A et les résultats viscoélastiques sont à la base de la méthode 'différence de contrainte' entre la charge et la décharge, donc, les erreurs viscoélastiques de la mousse B sont plus grandes que la mousse A. Les valeurs des paramètres viscoélastiques analytiques des 4 cycles sur les 3 tests de la mousse B sont regroupées dans le tableau IV-19.

Tableau IV-19. Valeurs des paramètres viscoélastiques du modèle sur les trois tests (mousse B, 4cycles)

			Charge				Décharge			
			X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)
Mousse B	Test 1	Cy1	39.67	0.155	-217.63	22023	40.11	0.16	-217.93	22207
		Cy2	87.64	0.274	-208.71	22023	82.46	0.31	-217.93	22207
		Cy3	91.19	0.296	-204.70	22023	82.28	0.32	-214.13	22207
		Cy4	91.34	0.288	-196.20	22023	86.58	0.32	-206.03	22207
	Test 2	Cy1	37.59	0.143	-200.13	22023	38.16	0.14	-199.97	22207
		Cy2	62.37	0.081	-97.99	22023	59.37	0.11	-106.30	22207
		Cy3	70.93	0.133	-124.86	22023	68.03	0.16	-133.80	22207
		Cy4	68.00	0.143	-129.54	22023	65.74	0.16	-137.69	22207
	Test 3	Cy1	35.07	0.135	-203.50	22023	35.65	0.32	-201.76	22207
		Cy2	58.08	0.084	-106.20	22023	55.86	0.10	-112.77	22207
		Cy3	59.92	0.087	-104.01	22023	57.19	0.10	-109.95	22207
		Cy4	59.97	0.088	-103.01	22023	58.08	0.11	-109.76	22207

La figure IV-23 montre les comparaisons entre les courbes des réponses hyperélastiques analytiques et expérimentales de la mousse B dans le cas du test 1 pendant 4 cycles. Elle montre que les résultats du modèle présentent une bonne concordance avec les réponses expérimentales. Les valeurs des paramètres hyperélastiques et les erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse B sur les 4 cycles sont données par le tableau IV-20 et le tableau IV-21.

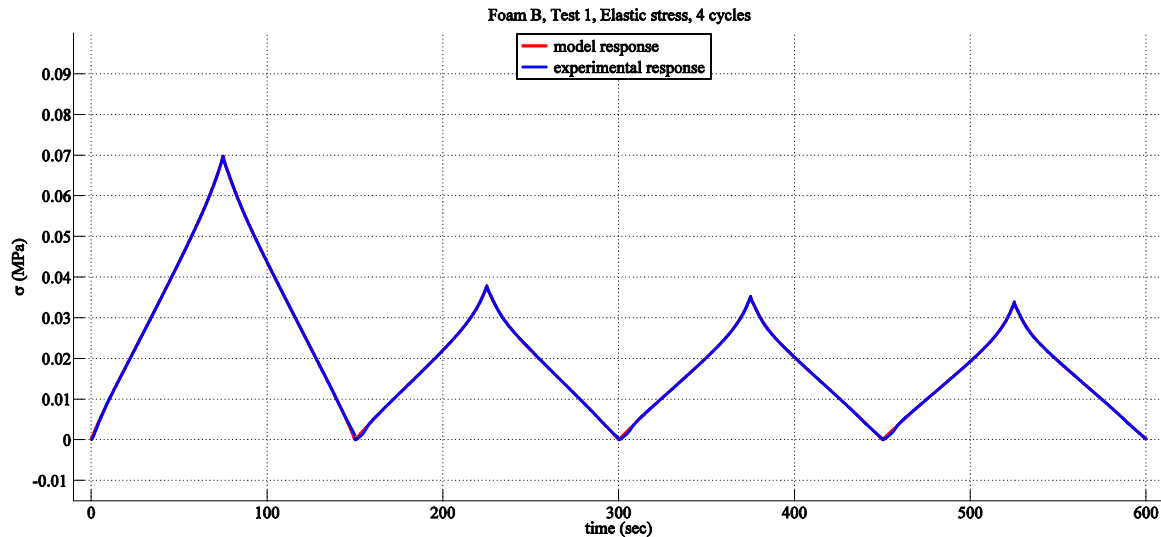


Figure IV-23 Comparaison des courbes hyperélastiques pour la mousse B dans le cas du test 1

Tableau IV-20. Valeurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse B

		μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse B	Test 1	Cy1	15.23	1.56	-15.22	1.55	1.7e-3
		Cy2	24.08	1.74	-24.05	1.73	9.8e-4
		Cy3	27.01	1.80	-26.99	1.80	5.9e-4
		Cy4	28.03	1.91	-27.94	1.91	-0.08
	Test 2	Cy1	15.22	1.56	-15.22	1.55	1.6e-3
		Cy2	24.08	1.73	-24.07	1.73	2.4e-3
		Cy3	24.08	1.73	-24.07	1.73	3.5e-3
		Cy4	24.08	1.73	-24.07	1.73	3.4e-3
	Test 3	Cy1	15.23	1.56	-15.22	1.55	1.5e-3
		Cy2	24.08	1.74	-24.07	1.74	1.2e-3
		Cy3	26.99	1.79	-26.99	1.80	1.1e-3
		Cy4	26.99	1.79	-26.99	1.80	1.2e-3

Tableau IV-21. Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse B

		Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse B	Test 1	hyperélastique	0.16	0.72	0.77	0.79
	Test 2	hyperélastique	0.16	0.86	0.86	0.83
	Test 3	hyperélastique	0.15	0.79	0.86	0.87

La figure IV-24 montre les résultats globaux de la mousse B sur les trois vitesses. Le résultat du cycle 1 est en bonne concordance avec le résultat expérimental. Cependant, les réponses des cycles 2, 3 et 4 montrent un décalage par rapport aux courbes expérimentales dans la zone de départ de l'essai et à la fin de l'essai. Les erreurs globales pour la mousse B sont regroupées dans le tableau IV-22.

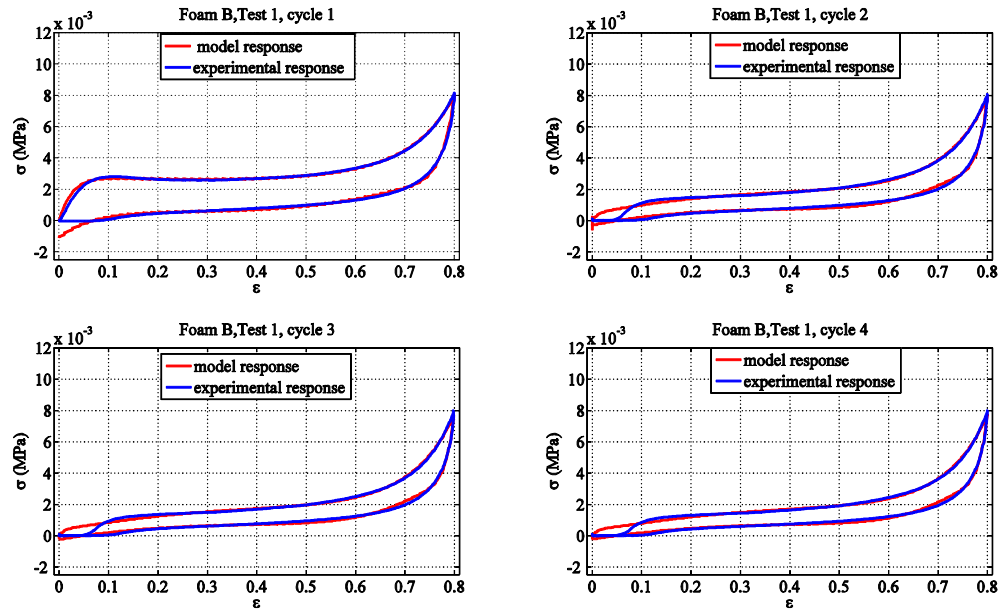


Figure IV-24 Les courbes contrainte-déformation globales pour la mousse B dans le cas du test 1

Tableau IV-22. Erreurs globales pour la mousse B

		Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse B	Test 1	global	3.26	5.66	5.70	5.71
	Test 2	global	2.77	4.47	4.91	4.91
	Test 3	global	2.15	3.84	4.03	4.05

On constate dans le tableau IV-22 que les erreurs globales augmentent lorsque les cycles augmentent pour la mousse B. Cette observation s'explique car les erreurs sont cumulées avec l'augmentation du cycle. Cependant, les résultats restent satisfaisant, l'erreur maximale ne dépasse pas 6%.

4.3.3 Résultats de la mousse C pour 3 vitesses lors des 4 cycles

Toujours dans un but de comparer les trois mousses, les résultats de la mousse C sont présentés dans cette partie. La figure IV-25 montre les comparaisons entre les courbes de la différence de contraintes analytiques et expérimentales entre la charge et la décharge. Les courbes du modèle (en rouge) présentent une bonne concordance avec les courbes expérimentales (en noir).

Les valeurs des paramètres viscoélastiques issues du modèle analytique de la mousse C sont données par tableau IV-23. Les erreurs des paramètres viscoélastiques pour la mousse C sur tous les tests sont regroupées dans le tableau IV-24.

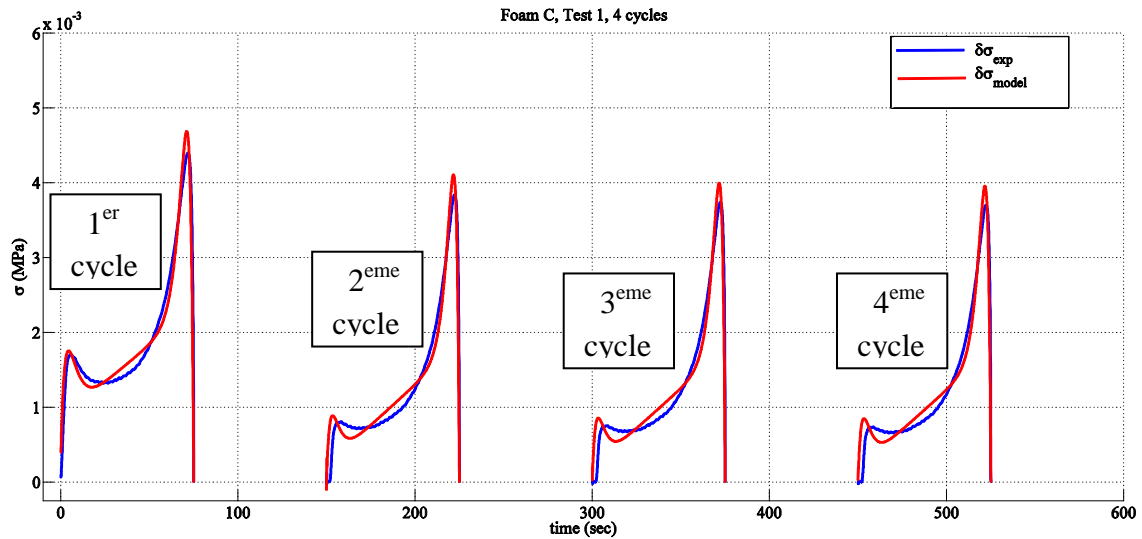


Figure IV-25 Courbes des différences de contraintes pour la mousse C dans le cas du test 1

Tableau IV-23. Valeurs des paramètres visco élastiques analytiques de la mousse C

			Charge				Décharge			
			X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)
Mousse C	Test 1	Cy1	42.64	0.19	-217.34	22023	43.31	0.209	-227.63	22027
		Cy2	52.13	0.23	-206.86	22023	52.38	0.258	-220.24	22027
		Cy3	52.31	0.24	-206.86	22023	52.49	0.258	-219.66	22027
		Cy4	52.21	0.24	-207.11	22023	52.42	0.259	-219.72	22027
	Test 2	Cy1	44.24	0.20	-217.48	22023	44.68	0.216	-226.86	22027
		Cy2	52.01	0.24	-207.35	22023	52.04	0.254	-218.24	22027
		Cy3	52.56	0.24	-206.92	22023	52.59	0.257	-217.57	22027
		Cy4	52.18	0.24	-207.59	22023	52.24	0.256	-217.85	22027
	Test 3	Cy1	48.31	0.22	-220.08	22023	48.10	0.225	-223.64	22027
		Cy2	56.81	0.25	-206.14	22023	56.27	0.263	-211.09	22027
		Cy3	57.32	0.26	-207.07	22023	56.59	0.264	-210.76	22027
		Cy4	57.61	0.26	-207.35	22023	57.05	0.268	-211.32	22027

Tableau IV-24. Erreurs des paramètres visco élastiques pour la mousse C

		Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse C	Test 1	Visco élastique	8.70	11.10	11.20	11.30
	Test 2	Visco élastique	8.41	10.21	10.81	10.81
	Test 3	Visco élastique	6.50	8.68	8.69	9.24

La figure IV-26 donne les comparaisons entre les réponses hyper élastiques analytiques et expérimentales. Elle montre que la différence de la contrainte hyper élastique maximale entre le cycle 1 et les cycles 2, 3 et 4 est plus petite que pour la mousse B (figure IV-23). Les valeurs des paramètres hyper élastiques sont regroupées dans le tableau IV-25. Les erreurs des paramètres hyper élastiques sur tous les tests sont données par le tableau IV-26.

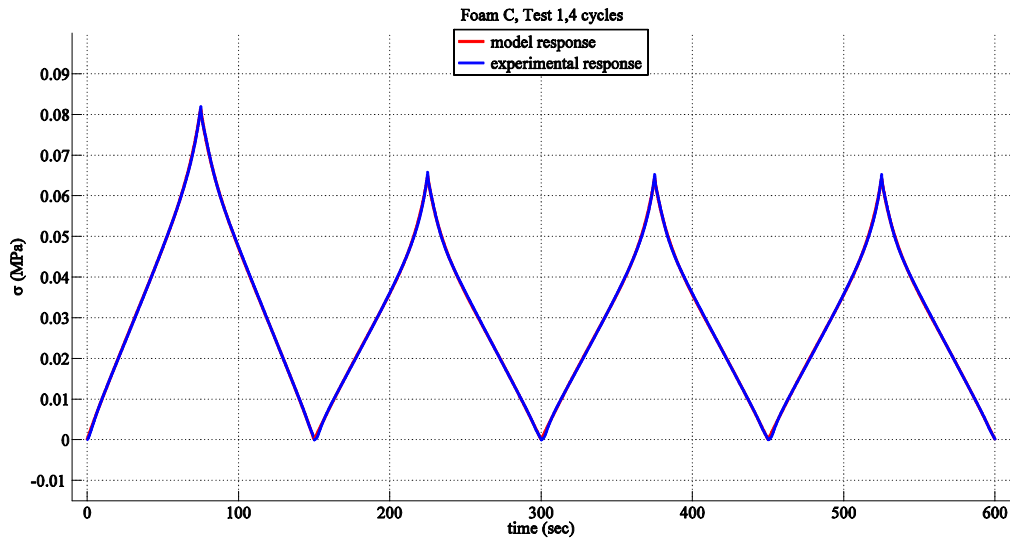


Figure IV-26 Comparaison des courbes hyperélastiques pour la mousse C dans le test 1

Tableau IV-25. Valeurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse C

			μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
Mousse C	Test 1	Cy1	37.38	1.76	-37.37	1.75	7.4e-4	20.56
		Cy2	85.34	1.93	-85.33	1.93	4.9e-5	20.24
		Cy3	87.46	1.93	-87.45	1.93	1.6e-5	19.96
		Cy4	103.31	1.93	-103.29	1.93	9.2e-7	20.13
	Test 2	Cy1	19.03	1.78	-19.02	1.77	7.7e-4	24.10
		Cy2	69.62	1.96	-69.60	1.78	2.8e-4	25.41
		Cy3	73.02	1.96	-73.01	1.96	2.1e-4	24.90
		Cy4	84.84	1.96	-84.87	1.96	1.8e-4	25.71
	Test 3	Cy1	37.38	1.75	-37.37	1.75	4.3e-4	51.10
		Cy2	37.38	1.75	-37.37	1.75	7.9e-4	17.81
		Cy3	37.38	1.75	-37.37	1.75	7.6e-4	16.81
		Cy4	37.38	1.75	-37.37	1.75	7.2e-4	18.12

Tableau IV-26. Erreurs des paramètres hyperélastiques pour la mousse C

			Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse C	Test 1	hyperélastique		0.27	0.54	0.56	0.56
	Test 2	hyperélastique		0.34	0.60	0.61	0.61
	Test 3	hyperélastique		0.32	0.36	0.41	0.38

La figure IV-27 montre les réponses en termes de contraintes du modèle en fonction du temps. Les résultats globaux de contrainte-déformation sont donnés par la figure IV-28. Les erreurs globales pour la mousse C sur trois tests pendant 4 cycles sont regroupés dans le tableau IV-27.

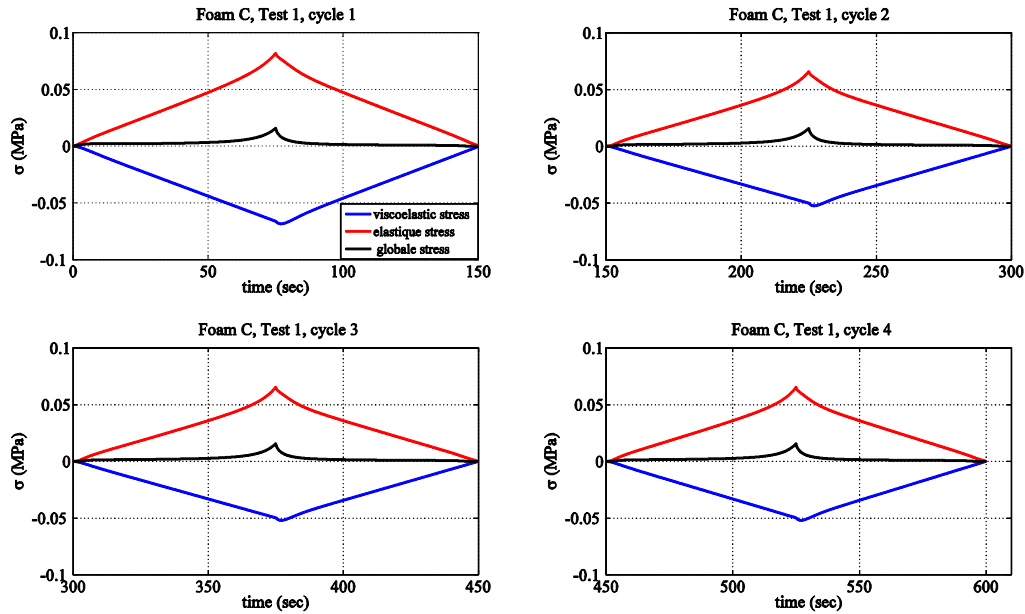


Figure IV-27 Réponses en termes de contraintes du modèle en fonction du temps

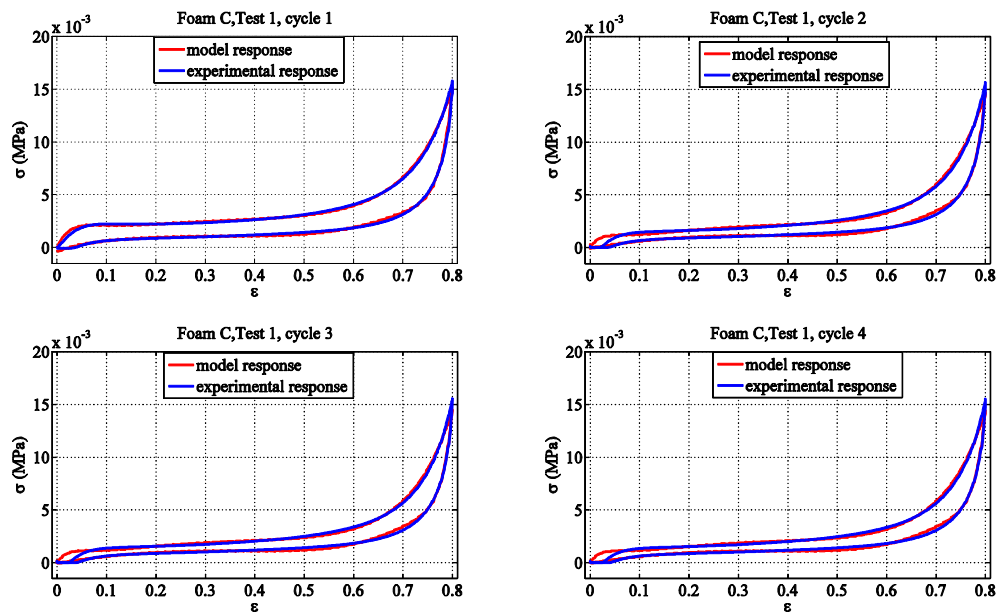


Figure IV-28 Résultats globaux de contrainte-déformation

Tableau IV-27. Erreurs globales pour la mousse C

			Erreurs	Cy1 (%)	Cy2 (%)	Cy3 (%)	Cy4 (%)
Mousse C	Test 1	global		3.34	4.69	4.79	4.81
	Test 2	global		3.34	4.71	4.76	4.72
	Test 3	global		3.92	3.71	4.13	3.81

Comme montré ci-dessus, les résultats des trois mousses sur les trois vitesses pendant des 4 cycles sont détaillés. Les comparaisons entre ces trois mousses dans le cas du test 1 des 4 cycles seront présentées dans la section suivante.

4.4 Résultats des comparaisons entre les trois mousses pour les trois vitesses

La figure IV-29 montre les comparaisons des résultats hyperélastiques des trois mousses pendant 4 cycles sur le test 1. Les résultats de comparaison des contraintes viscoélastiques entre les trois mousses, qui sont obtenues par le modèle à mémoire sont donnés par la figure IV-30. Les résultats des comparaisons dans le cas du test 2 et test 3 ne sont pas présentés, car ils sont similaires à ceux du test 1.

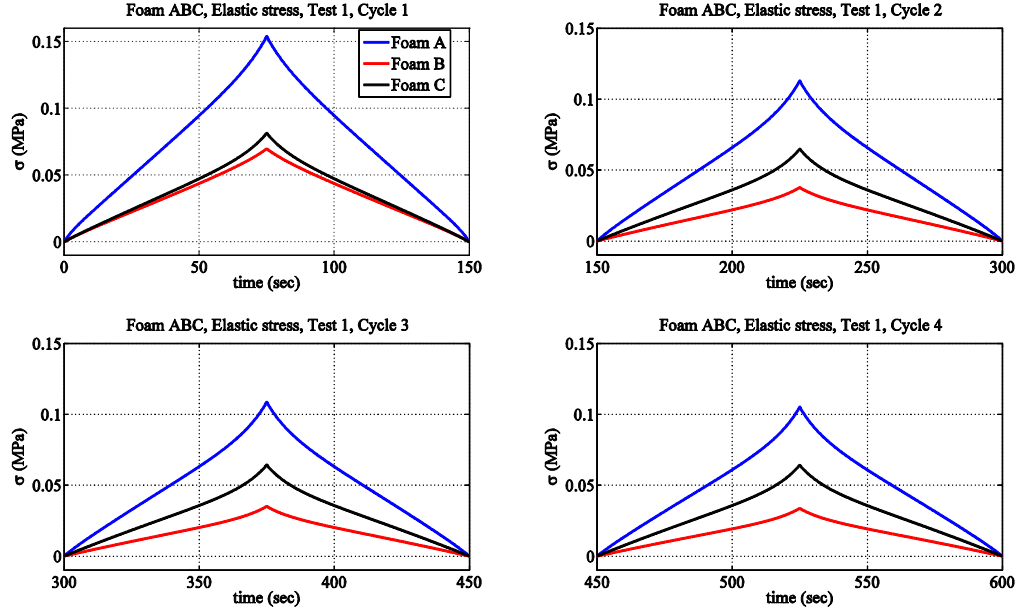


Figure IV-29 Comparaisons des résultats hyperélastiques des trois mousses pendant 4 cycles sur le test 1

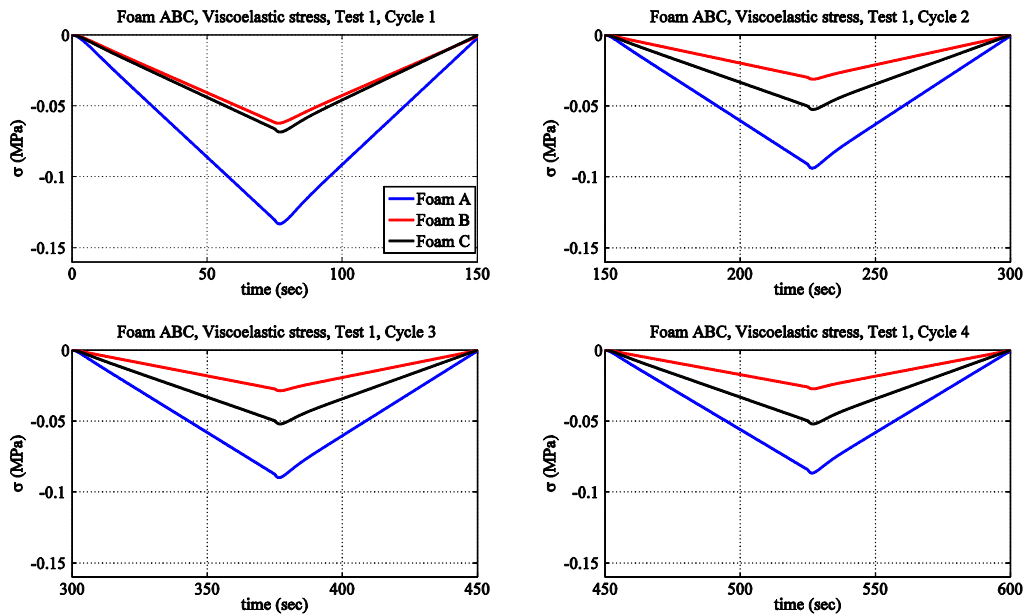


Figure IV-30 Comparaisons des résultats viscoélastiques des trois mousses pendant 4 cycles sur le test 1

On constate sur la figure IV-29 que la contrainte hyperélastique de la mousse A est plus grande que celles des mousses B et C. Les contraintes hyperélastiques de la mousse B et C sont presque les mêmes pour le cycle 1. Cependant, elles présentent une grande différence pour les cycles 2, 3 et 4. On peut également voir que les contraintes maximales sont différentes entre les trois mousses pendant 4 cycles. C'est-à-dire que les contraintes maximales pour les trois mousses lors du 1^{er} cycle sont plus grandes que pour les cycles 2, 3 et 4.

La figure IV-30 montre que l'estimation des contraintes viscoélastiques présente une même tendance que les contraintes hyperélastiques. Cependant, tous les signes pour la contrainte viscoélastique sont négatifs.

La figure IV-31 montre les comparaisons des réponses contrainte-déformation globales entre les trois mousses pendant 4 cycles dans le cas du test 1. On constate que la réponse de la mousse A présente une grande différence avec les mousses B et C pendant l'ensemble des 4 cycles. Les réponses des mousses B et C montrent une grande différence dans la zone de densification. Cependant, il ne présente pas de différence importante dans la zone de plateau.

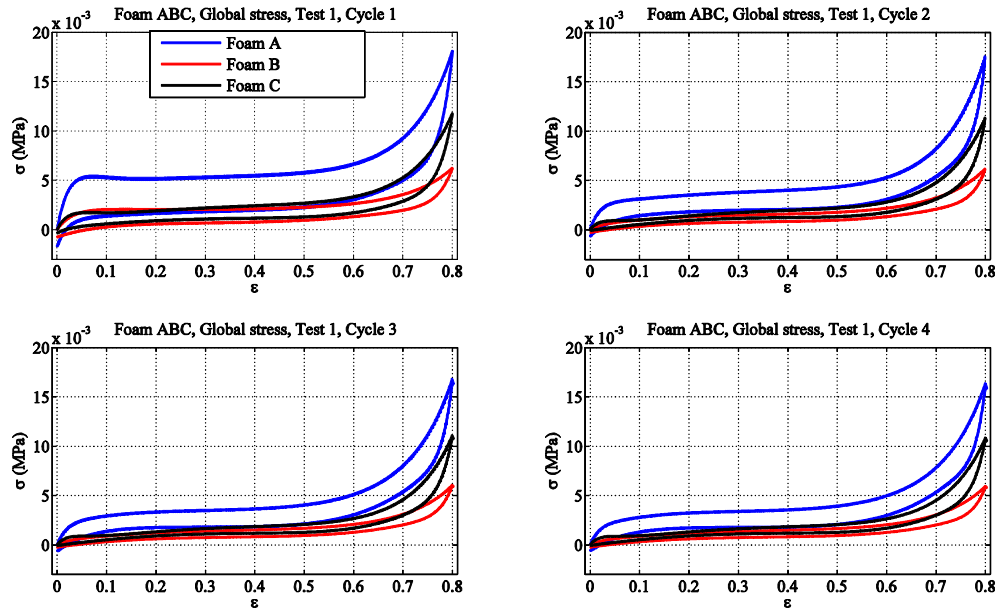


Figure IV-31 Comparaisons des résultats globaux des trois mousses pendant 4 cycles (test 1)

Dans cette section, nous avons présentés les comparaisons des trois mousses dans le cas du test 1 pendant 4 cycles. Selon les résultats, les trois mousses présentent vraiment les comportements viscoélastiques et hyperélastiques différents. De plus, à travers les résultats des contraintes viscoélastiques, il a été montré que le modèle à mémoire entier peut prévoir correctement le comportement viscoélastique des mousses de polyuréthanes différentes. Il a également été montré que le modèle d'Ogden est adapté pour la modélisation du comportement hyperélastique de la mousse de polyuréthane.

4.5 Conclusion du chapitre IV

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté la modélisation de l'effet de Mullins. Le modèle à mémoire entier avec les paramètres différents entre la charge et la décharge est utilisé pour identifier le comportement viscoélastique des trois mousses étudiées sur trois vitesses pendant 4 cycles. Le modèle hyperélastique d'Ogden permet de modéliser le comportement hyperélastique de la mousse.

Ensuite, les résultats de la modélisation de l'effet de Mullins pour les trois mousses ont été détaillés. Les paramètres adimensionnels des modèles à mémoire que nous avons développés dans ce chapitre sont obtenus pour les trois mousses sur les trois tests pendant 4 cycles. Le modèle à mémoire entier reconstruit le comportement viscoélastique de la mousse de polyuréthane en concordance avec l'expérimentation. La contrainte viscoélastique modélise l'effet de relaxation et explique la présence d'une contrainte résiduelle non permanente à la fin des essais. Cette observation est en particulier visible sur les cycles 2, 3 et 4. La réponse de la contrainte hyperélastique donnée par le modèle d'Ogden est de signe positif et donc s'oppose à la contrainte viscoélastique.

Les résultats de comparaison pour la mousse A sur trois tests pendant 4 cycles ont été détaillés. Ils montrent que les contraintes hyperélastiques du cycle 1 sont plus grandes que les cycles 2, 3 et 4. Cependant, il est également montré qu'il n'existe pas de grande différence entre les cycles 2, 3 et 4. Les contraintes viscoélastiques et les contraintes globales présentent les mêmes tendances que les contraintes hyperélastiques. On peut déduire de cette observation que la mousse absorbe plus énergie pendant le cycle 1 que dans les cycles de compression/décompression suivants. Cependant, l'énergie absorbée par la mousse ne présente pas trop de différence lors des cycles 2, 3 et 4. C'est-à-dire que la mousse a plus de capacité à absorber l'énergie lors du cycle 1 et qu'elle atteint un régime plus stable à partir du 2^{ème} cycle.

Enfin, les comparaisons des trois mousses dans le cas du test 1 pendant 4 cycles sont données. Les résultats montrent que les trois mousses présentent des comportements hyperélastiques et viscoélastiques différents. Suite aux comparaisons des trois mousses sur les trois tests pendant 4 cycles, l'application du modèle à mémoire entier pour modéliser le comportement viscoélastique sur différents types de mousse et différents cycles est convenable et généralisable. Le modèle hyperélastique d'Ogden est également acceptable pour la modélisation du comportement hyperélastique de la mousse sur les différentes vitesses pendant 4 cycles.

Conclusion g é n é r a l e et perspectives

❖ Conclusion g é n é r a l e

Au travers de cette é t u d e , nous nous sommes propos é d' é t u d i e r le comportement quasi-statique de la mousse de polyur éthane. La mousse est couramment utilis ée dans la partie r é a l i s é e des syst è m e s d' assises modernes telles que les si è g e s de voiture, de train etc. L'objectif de ce travail é t a i t de comprendre le comportement m é c a n i q u e de ces mousses de polyur éthane.

Afin de bien é t u d i e r le comportement m é c a n i q u e de la mousse, nous avons s é p a r é notre travail en 4 parties. La premi è r e partie de la recherche a permis, gr â c e à une analyse bibliographique, d' é v a l u e r des propri é t é s chimiques et physiques de la mousse. Nous avons d'abord mis en é v i d e n c e les bases de la chimie de la mousse de polyur éthane ainsi que certains param è t r e s , à savoir la structure cellulaire, la densit é , la porosité et la m é t h o d e de formulation etc., qui ont une influence sur le comportement m é c a n i q u e . L'analyse des essais classiques, à savoir les tests statiques, les tests quasi-statiques et les tests dynamiques nous a permis de choisir l'essai de compression/décompression quasi-statique pour é t u d i e r le comportement quasi-statique de la mousse. Les é t u d e s bibliographiques ont montr é que la mousse de polyur éthane pr é s e n t e à la fois un comportement é l a s t i q u e non-linéaire et un comportement visco é l a s t i q u e sous grande d é f o r m a t i o n pendant les essais de compression/décompression unidirectionnels. Les analyses de l'effet de Mullins pour la mousse de polyur éthane nous permettent de mod é l i s e r le comportement m é c a n i q u e pendant les essais multicycles.

Une synth è s e des diff é r e n t s types de mod è l e s , à savoir les mod è l e s microm é c a n i q u e s et les mod è l e s macrom é c a n i q u e s , nous a permis, apr è s avoir compar é leurs qualit é s et leurs d é f a u t s , de choisir le mod è l e à m é m o i r e entier pour la mod é l i s a t i o n du comportement visco é l a s t i q u e et les mod è l e s é n e r g é t i q u e s pour la mod é l i s a t i o n du comportement hyper é l a s t i q u e des mousses de polyur éthane.

Enfin, nous nous sommes int é r e s s é s aux é t u d e s des m é t h o d e s d'identification et à l'optimisation des param è t r e s des mod è l e s . L'analyses de m é t h o d e s , à savoir la m é t h o d e de la contrainte moyenne et la m é t h o d e de la diff é r e n c e de contrainte entre la charge et la d é c h a r g e , nous a permis de choisir la m é t h o d e de la diff é r e n c e de contrainte pour les é t u d e s dans ce travail.

Dans la deuxi è m e partie, afin de pouvoir d é v e l o p p e r une mod é l i s a t i o n fiable des mousses de polyur éthane, nous avons conduits une é t u d e exp é r i m e n t a l e . Des observations microscopiques nous ont permis de d é t e r m i n e r les propri é t é s physico-chimiques des mousses que nous avons é t u d i é s . Gr â c e à la machine «Instron 33R4240», nous avons effectu é des essais de compression/décompression unidirectionnels monocycle et multi-cycles sur diff é r e n t s types de mousse de polyur éthane et pour diff é r e n t e s vitesses de sollicitation. Gr â c e aux r é s u l t a t s des essais de compression/décompression, nous avons pu faire les simulations issues de la mod é l i s a t i o n et les r é s u l t a t s exp é r i m e n t a l e s de la mousse de polyur éthane.

Selon les résultats expérimentaux obtenus par la deuxième partie, la mousse de polyuréthane présente à la fois un comportement viscoélastique et un comportement hyperélastique pendant les essais de compression/décompression unidirectionnels. Donc, pour les études du comportement quasi-statique de la mousse de polyuréthane nous avons proposé dans la troisième partie, trois modèles visco-hyperélastiques. Ces modèles sont très intéressants et se composent de deux éléments :

- Viscoélasticité : modèle à mémoire entier
- Hyperélasticité : modèle d'Ogden, modèle polynomial et modèle polynomial réduit

Les trois modèles globaux visco-hyperélastiques, c'est-à-dire la combinaison des deux éléments, à savoir le modèle visco-hyperélastique d'Ogden, le modèle visco-hyperélastique polynomial, le modèle visco-hyperélastique polynomial réduit, sont utilisés pour l'identification du comportement global de la mousse. La méthode de la différence de contrainte entre la charge et la décharge est utilisée pour identifier le comportement viscoélastique avec les paramètres adimensionnels différents entre la charge et la décharge. Selon les résultats analytiques, nous avons constaté que le modèle à mémoire entier peut décrire le comportement viscoélastique de la mousse. Par contre, nous avons également montré que le modèle Mooney-Rivlin et le modèle neo-Hookeen ne peuvent pas prévoir correctement le comportement hyperélastique de nos mousses. Cependant, le modèle d'Ogden $N=3$, le modèle polynomial avec $N=2$ et le modèle polynomial réduit avec $N=3$ sont adaptés pour la description du comportement hyperélastique de la mousse. Les résultats des comparaisons entre les trois modèles nous permettent de conclure que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden est le meilleur modèle et nous l'avons choisi pour la modélisation du comportement de l'effet de Mullins.

Grâce aux résultats du modèle obtenus dans la troisième partie, nous avons utilisé dans la dernière partie, le modèle visco-hyperélastique d'Ogden pour modéliser le comportement mécanique de la mousse pendant les essais compression/décompression multicycles. La modélisation de l'effet de Mullins a permis la modélisation du comportement de mousses au cours de 4 cycles de charge/décharge. Les résultats des comparaisons des paramètres des différentes mousses ainsi que les différentes vitesses, nous permettent de conclure que le modèle visco-hyperélastique d'Ogden est également adapté à la modélisation de l'effet de Mullins.

Nous avons développé les trois modèles visco-hyperélastiques pour la description du comportement mécanique de la mousse dans cette thèse. En raison des comparaisons entre ces trois modèles, le modèle visco-hyperélastique d'Ogden a présenté le meilleur résultat qui nous permet d'utiliser ce modèle pour les études du comportement mécanique de la mousse.

❖ Perspectives

La généralisation du modèle visco-hyperélastique d'Ogden à d'autres types de mousses semble être une perspective intéressante, que ce soit pour le modèle à mémoire entier pour la partie viscoélasticité et le modèle d'Ogden pour la partie hyperélasticité.

On a pu constater que les paramètres du modèle pour le 1^{er} cycle prennent des valeurs différentes pour les essais monocycles et multicycles. Une étude de sensibilité des paramètres, en particulier sur les paramètres hyperélastiques du modèle d'Ogden, semble à présent nécessaire.

Lors de la remontée du plateau supérieur du dispositif d'essai, on constate une perte de contact sur la fin de la décharge. Ce phénomène n'est pas modélisable par nos modèles. Une adaptation du protocole d'essai, comme par exemple coller la mousse sur les plateaux de la machine, ou redéfinir le temps de retour (pour retourner la compression immédiatement après la perte de contact entre le plateau supérieur et la mousse) offre une perspective qui mérite d'être exploré.

Enfin, l'application du modèle visco-hyperélastique d'Ogden pour les essais dynamiques est une suite logique de ce travail.

R é f é r e n c e s b i b l i o g r a p h i q u e s

- [ALA13] Alam, M. M., Miras, J., P é r e z - C a r r i l l o , L . A . , V í c h e z , S . , S o l a n s , C . , I m a e , T . , ... & Esquena, J. (2013). Facile synthesis of dual micro/macroporous carbonaceous foams by templating in highly concentrated water-in-oil emulsions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 182, 102-108.
- [BAG84] Bagley R.L. and Torvik P.J. (1984). "Foundations of optimization" (second edition). Englewood Cliffs.
- [BEL06] Belouettar, S., Rauchs, G., Kirsch, A., & Bieck, W. (2006). Modélisation d'un siège typique de voiture. *Mat é r i a u x & T e c h n i q u e s*, 94(3), 217-226.
- [BER09] Berthier, J. C. (2009). Polyuréthanes PUR. *Techniques de l'ing é n i e u r . P l a s t i q u e s e t c o m p o s i t e s*, (AM3425v2).
- [BIK09] Bikard, J. (2009). Fabrication des mousses en polyuréthane. Ed. *Techniques Ing é n i e u r*.
- [BLA74] Blaga, A. (1974). Rigid thermosetting plastic foams.
- [BOU10] Bouallagui S. (2010). "Technique d'optimization d é t e r m i n i s t e e t s t o c h a s t i q u e p o u r l a r é s o l u t i o n d e s p r o b l é m e s d i f f i c i l e s e n c r y p t o l o g i e". Institut National des Sciences Appliqu é e s de Rouen, France, Phd thesis.
- [CHA04] Chang, S., Hong, D., & Chiang, F. P. (2004). Macro and micro deformations in a sandwich foam core. *Composites Part B: Engineering*, 35(6), 503-509.
- [CHA11] Charmetant, A. (2011). Approches hyper é l a s t i q u e s p o u r l a m o d é l i s a t i o n d u c o m p o r t e m e n t m é c a n i q u e d e p r é f o r m e s t i s s é e s d e c o m p o s i t e s (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- [CHR00] Christensen, R. M. (2000). Mechanics of cellular and other low-density materials. *International Journal of Solids and Structures*, 37(1), 93-104.
- [CUL94] Culioli J.C. (1994). "Introduction à l'optimisation". Ellipses, ISBN 26729-89428-4.
- [DAW82] Dawson, J. R., & Shortall, J. B. (1982). The microstructure of rigid polyurethane foams. *Journal of Materials Science*, 17(1), 220-224.
- [DEN12] Denay, A. G. (2012). Mécanismes et tenue mécanique long-terme de mousses polyuréthanes pures et renforc é e s a u x t e m p é r a t u r e s c r y o g é n i q u e s (Doctoral dissertation, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Sup é r i e u r e d e M é c a n i q u e e t d'A é r o t e c h n i q u e - P o i t i e r s) .
- [DEN03] Deng, R., Davies, P., & Bajaj, A. K. (2003). Flexible polyurethane foam modelling and identification of viscoelastic parameters for automotive seating applications. *Journal of Sound and Vibration*, 262(3), 391-417.

- [DEN04] Deng, R. (2004). Modeling and characterization of flexible polyurethane foam.
- [DIE87] Dieter, J. W., & Byrne, C. A. (1987). Aliphatic polyurethane elastomers with high performance properties. *Polymer Engineering & Science*, 27(9), 673-683.
- [DOR04] Dorfmann, A., & Ogden, R. W. (2004). A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber. *International Journal of Solids and Structures*, 41(7), 1855-1878.
- [FER80] Ferry, J. D. (1980). Viscoelastic properties of polymers.
- [FLO10] Flores-Johnson, E. A., & Li, Q. M. (2010). Indentation into polymeric foams. *International Journal of Solids and Structures*, 47(16), 1987-1995.
- [FRA05] Fancois, D. (2005). Essais m é c a n i q u e s d e s m é t a u x : E s s a i s d e d u r e t é T e c h n i q u e s d e l ' i n g é n i e u r . M a t é r i a u x m é t a l l i q u e s , (M 4 1 6 0) .
- [GIB97] Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular Solids. Structure and properties - Second edition. Cambridge Solid State Science Series.
- [GIL01] Gilchrist, A., & Mills, N. J. (2001). Impact deformation of rigid polymeric foams: experiments and FEA modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 25(8), 767-786.
- [GON05] Gong, L., Kyriakides, S., & Jang, W. Y. (2005). Compressive response of open-cell foams. Part I: Morphology and elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, 42(5), 1355-1379.
- [GOV97] Govindjee, S., & Reese, S. (1997). A presentation and comparison of two large deformation viscoelasticity models. *Journal of engineering materials and technology*, 119(3), 251-255.
- [HAD95] Haddad, Y. M. (1995). Viscoelasticity of engineering materials. Springer.
- [HAJ03] HaJJi, O. (2003). Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs é l e c t r o t e c h n i q u e s (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- [HAT88] Hatat, D. (1988). Polyur é t h a n e s P U R . T e c h n i q u e s d e l ' i n g é n i e u r . P l a s t i q u e s e t c o m p o s i t e s , (A 3 4 2 5) .
- [HER97] Herrington, R., & Hock, K. (Eds.). (1997). Flexible polyurethane foams. Dow Chemical Company.
- [HIL91] Hilyard, N. C., Lee, W. L., & Cunningham, A. (1991). Energy dissipation in polyurethane cushion foams and its role in dynamic ride comfort. *Cellular Polymers*, 20-22.

- [HUA96] Huang, J. S., & Lin, J. Y. (1996). Fatigue of cellular materials. *Acta materialia*, 44(1), 289-296.
- [IPP08] Ippili, R. K., Davies, P., Bajaj, A. K., & Hagenmeyer, L. (2008). Nonlinear multi-body dynamic modeling of seat-occupant system with polyurethane seat and H-point prediction. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(5), 368-383.
- [JAS82] JASO B 407-82. (1982). Test Code of Seating Comfort for Automobile Seats. Society of Automotive Engineers of Japan.
- [JMA12] Jmal, H., (2012). Identification du comportement quasi-statique et dynamique de la mousse de polyuréthane au travers de modèles à mémoire. (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace).
- [LEM04] Lemaître, J., & Chaboche, J. L. (2004). Solid material mechanics.
- [LI09] Li, B., Gu, Y. D., English, R., Rothwell, G., & Ren, X. J. (2009). Characterisation of nonlinear material parameters of foams based on indentation tests. *Materials & Design*, 30(7), 2708-2714.
- [MAN13] Manalo, A. (2013). Structural behaviour of a prefabricated composite wall system made from rigid polyurethane foam and Magnesium Oxide board. *Construction and Building Materials*, 41, 642-653.
- [MIL81] Miltz, J., & Gruenbaum, G. (1981). Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements. *Polymer Engineering & Science*, 21(15), 1010-1014.
- [MIL00] Mills, N. J., & Gilchrist, A. (2000). Modelling the indentation of low density polymer foams. *Cellular polymers*, 19(6), 389-412.
- [MIN83] Minoux M. (1983). "Programmation mathématique: Tome 1 Théorie et algorithme". Dunod, ISBN 2-040-15487-6.
- [MOO40] Mooney M.A. (1940) A theory of large elastic deformation. *Journal of Applied Physics* 11, 582-592.
- [MOR89] Morton-Jones, D. H. (1989). Polymer processing. London: Chapman and Hall.
- [MUL69] Mullins, L. (1969). Softening of rubber by deformation. *Rubber Chemistry and Technology*, 42(1), 339-362.
- [MUL48] Mullins, L. (1948). Effect of stretching on the properties of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 21(2), 281-300.
- [OGD99] Ogden, R. W., & Roxburgh, D. G. (1999). A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1988), 2861-2877.

- [OGD72] Ogden, R. W. (1972). Large deformation isotropic elasticity-on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 328(1575), 567-583.
- [OLU00] Olurin, O. B., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2000). Deformation and fracture of aluminium foams. *Materials Science and Engineering: A*, 291(1), 136-146.
- [OUD93] Oudet, C. (1993). *Polym ères: structure et propri étés*, introduction. Masson.
- [PEL12] Pellizzi, E. (2012). *Etude du vieillissement des mousses de polyuréthane ester et consolidation par les aminoalkylalkoxysilanes* (Doctoral dissertation, Evry-Val d'Essonne).
- [PIC10] Pichon, p. (2010). *Fatigue thermomécanique des élastom ères polyuréthane: caractérisation expérimentale de l'évolution des microstructures et modélisation des échanges thermiques* (Doctoral dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon)
- [POR96] Porter, D. (1996). Materials modelling: A bridge from atoms to bulk properties. *Advanced Performance Materials*, 3(3-4), 309-324.
- [PRE92] Press W.H. (1992). "Numerical Recips in C: The art of computing". Cambridge University Press, ISBN 0-521-43108-5.
- [PRU00] Prudent, O., Thionnet, A., Gourguechon, O., Pajon, M., Bakacha, M., & Renard, J. (2000). Simulation numérique du confort de sièges d'automobiles: comportement mécanique 3D de mousses de polyuréthane; optimisation 2D d'un profil simplifié de siège. *Mécanique & industries*, 1(5), 511-520.
- [RAK05] Rakow, J. F., & Waas, A. M. (2005). Size effects and the shear response of aluminum foam. *Mechanics of Materials* , 69-82.
- [RAM03] Ramachandra, S., Sudheer Kumar, P., & Ramamurty, U. (2003). Impact energy absorption in an Al foam at low velocities. *Scripta materialia*, 49(8), 741-745.
- [RAM90] Ramon, O., & Miltz, J. (1990). Prediction of dynamic properties of plastic foams from constant-strain rate measurements. *Journal of applied polymer science*, 40(9- 10), 1683-1692.
- [RIZ05] Rizov, V., Shipsha, A., & Zenkert, D. (2005). Indentation study of foam core sandwich composite panels. *Composite structures*, 69(1), 95-102.
- [RIZ07] Rizov, V. I. (2007). Low velocity localized impact study of cellular foams. *Materials & design*, 28(10), 2632-2640.
- [SAB13] Sabuwala, T., & Gioia, G. (2013). Skeleton-and-bubble model of polyether-polyurethane elastic open-cell foams for finite element analysis at large deformations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61(3), 886-911.

- [SAH05] Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, M. E., & Jeelani, S. (2005). Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. *Materials Science and Engineering: A*, 406(1), 328-336.
- [SAI06] Saint-Michel, F., Chazeau, L., & Cavaillé J. Y. (2006). Mechanical properties of high density polyurethane foams: II Effect of the filler size. *Composites science and technology*, 66(15), 2709-2718.
- [SAU64] Saunders, J. H., & Frisch, K. C. (1964). *Polyurethanes: chemistry and technology* (Vol. 16, No. Part 1, pp. 219-223). New York: Interscience Publishers.
- [SCH05] Schrodtt M, Benderoth G, Kühhorn A. *Technische Mechanik.*, 162-173 (2005).
- [SIN00] Singh, R. (2000). Dynamic modeling of polyurethane foam and development of system identification methodologies. Master's Thesis, Purdue University, School of Mechanical Engineering, West Lafayette, IN.
- [SIN01] Singh, R., Davies, P., & Bajaj, A. K. (2001). Initial condition response of a viscoelastic dynamical system in the presence of dry friction and identification of system parameters. *Journal of sound and vibration*, 239(5), 1086-1095.
- [SMA08] Smardzewski, J., Grbac, I., & Prekrat, S. (2008). Nonlinear mechanics of hyper elastic polyurethane furniture foams. *Drvna industrija*, 59(1), 23-28.
- [SZY99] Szycher, M. (Ed.). (1999). *Szycher's handbook of polyurethanes*. CRC press.
- [TAT99] Tate, P. M., & Talal, S. (1999). Compressive properties of rigid polyurethane foams. *Polymers & polymer composites*, 7(2), 117-124.
- [TRO06] Trotignon, J. P., Verdu, J., & Dobraczynski, A. (2006). *Matières plastiques structurespropriétés, mise en œuvre, normalisation*. Collection Précis. Afnor Nathan , [LaPlaine-Saint-Denis] Paris, [Édition mise à jour] édition
- [TU08] Tu, Y. C. (2008). *Polyurethane foams from novel soy-based polyols* (Doctoral dissertation, University of Missouri).
- [VAN97] Van der Burg, M. W. D., Shulmeister, V., Van der Geissen, E., & Marissen, R. (1997). On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models. *Journal of Cellular Plastics*, 33(1), 31-54.
- [WAR88] Warren, W. E., & Kraynik, A. M. (1988). The linear elastic properties of open-cell foams. *Journal of Applied Mechanics*, 55(2), 341-346.
- [WAR91] Warren, W. E., & Kraynik, A. M. (1991). The nonlinear elastic behavior of open-cell foams. *Journal of Applied Mechanics*, 58(2), 376-381.

- [WEA94] Weaire, D., & Phelan, R. (1994). A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. *Philosophical Magazine Letters*, 69(2), 107-110.
- [WHI98] White, S. W. (1998). Dynamic modeling and measurement of occupied car seats and seating foam. Master's Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 47907.
- [WHI00] White, S. W., Kim, S. K., Bajaj, A. K., Davies, P., Showers, D. K., & Liedtke, P. E. (2000). Experimental techniques and identification of nonlinear and viscoelastic properties of flexible polyurethane foam. *Nonlinear Dynamics*, 22(3), 281-313.
- [WID05] Widdle Jr, R. D. (2005). Measurement and modeling of the mechanical properties of polyurethane foam. Ph.D thesis, Purdue University, West Lafayette, IN 47907.
- [WID08] Widdle Jr, R. D., Bajaj, A. K., & Davies, P. (2008). Measurement of the Poisson's ratio of flexible polyurethane foam and its influence on a uniaxial compression model. *International Journal of Engineering Science*, 46(1), 31-49.
- [XUE03] Xue, Z., & Hutchinson, J. W. (2003). Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(4), 687-705.
- [YAN04] Yang, L. M., & Shim, V. P. W. (2004). A visco-hyperelastic constitutive description of elastomeric foam. *International journal of impact engineering*, 30(8), 1099-1110.
- [ZHU99] Zhu, H. X., & Mills, N. J. (1999). Modelling the creep of open-cell polymer foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47(7), 1437-1457.
- [ZHU97] Zhu, H. X., Knott, J. F., & Mills, N. J. (1997). Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(3), 319-343.